

# الكيمياء النووية والمشعة

الأستاذ الدكتور

فواز عزت الخليلي

الجامعة الأردنية





# الكيمياء النووية والمشعة

NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY

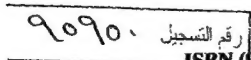
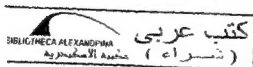
تأليف

أ.د. فواز عزت الخليلي

أستاذ الكيمياء النووية وغير العضوية

قسم الكيمياء

الجامعة الأردنية



رقم التسجيل ٩٥٩٥٠

دمك (9957-05-091-5) ISBN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دار الضيافة للنشر والتوزيع

عمان - الأردن

صندوق بريد : ٩٢٥٧٩٨ - الرمز : ١١١٩٠

هاتف وفاكس : ٠٠٩٦٢ ١٥١٧٨٥٠٢

البريد الإلكتروني : info@daraldia.com

الموقع على الإنترنت : www.daraldia.com

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية ٢٠٠١/١٢/٢٥٠٩

٥٤١,٢٨

الخطي ، فواز عزت  
الكيمياء النووية والكيمياء -  
NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY  
/ فواز عزت الخطي - عمان : دار الضيافة للنشر والتوزيع ، ٢٠٠١  
(٢٣٦ ص)  
و.إ. (٢٠٠١/١٢/٢٥٠٩)  
الواصفات : / الكيمياء الإشعاعية // الكيمياء /

تم إعداد بيانات الفهرسة والتصنيف الأولية من قبل دائرة المكتبة الوطنية

رقم الإيداع للتسلسل ٢٠٠١/١٢/٢٣٦٦

جميع الحقوق محفوظة

١٤٢٩ هـ / ٢٠٠٨ م

صمم الغلاف : أنس أحمد الجدع

## إهداء

إلى ذكرى والدي عزت حمدي الخليلي العطرة .

أ.د. فواز عزت الخليلي

تم بعون الله إنجاز هذا الكتاب في إجازة التفرغ العلمي .  
راجياً من الله تعالى أن يكون مفيداً للدارسين والمهتمين في هذا  
الموضوع . كما أشكر الجامعة الأردنية على إتاحة الفرصة لتأليف  
هذا الكتاب .

والسلام عليكم ورحمة الله .

أ.د. فواز عزت الخليلي



## المحتويات

الصفحة	الموضوع
7	1 - الفصل الأول : المقدمة .....
19	2 - الفصل الثاني : بنية النواة وطاقة الربط النووي .....
53	3 - الفصل الثالث : طرق التحلل الإشعاعي النووي .....
81	4 - الفصل الرابع : معادلات تحلل وغو النشاط الإشعاعي ..
101	5 - الفصل الخامس : تفاعلات الإشعاعات مع المادة .....
147	6 - الفصل السادس : أجهزة كشف وقياس الإشعاع النووي .
177	7 - الفصل السابع : استخدامات النظائر المشعة في الكيمياء .
223	8 - الفصل الثامن : الطاقة النووية .....
281	9 - ملحق - أ - : TABLE OF NUCLIDES .....
322	10 - ملحق - ب - : Chart of the Nuclides .....





# الفصل الأول

## مقدمة

### INTRODUCTION

اكتشف العالم رونتجن في عام 1895 أشعة أكس (X) ووجد أنها تتكون باصطدام الإلكترونات ذات الطاقة العالية بالمصعد في أنبوب التفريغ وقد أطلق عليها اسم أشعة إكس ، وسميت أحياناً بأشعة رونتجن . وهي ذات قدرة عالية على الاختراق . وبعد ذلك بعام اكتشف العالم الفرنسي هنري بيكورييل أن ملح اليورانيوم المزدوج  $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$  يطلق إشعاعات تسود اللوحات الفوتوغرافية . وقد أثار هذا التأثير فضوله وقرر أن يقرم بعدة تجارب لمعرفة طبيعة ما يجري . فوجد أن هذا التأثير لا يتغير إذا تعرض ملح اليورانيوم لضوء خافت أو لضوء الشمس أو إذا تم تحضيره في الظلام وأجريت عليه التجربة في الظلام . كما وجد أن لهذا الإشعاع قدرة على اختراق الورق الأسود والزجاج . ثم قام بعد ذلك بدراسة أملاح اليورانيوم الأخرى ومحايله فوجد نفس الظاهرة وأن شدة التأثير تتناسب طردياً مع كمية عنصر اليورانيوم الموجودة في العينة المدروسة .

ولاحظ العالم بيكورييل أن لهذه الإشعاعات قدرة على إزالة الشحنة من كشاف كهربائي مشحون سابقاً . بعد ذلك تابع العلماء دراساتهم لفهم ما يحدث وفي عام 1898 توصل العالمان ماري وبري كوري إلى أن إشعاعات اليورانيوم هي ظاهرة نووية خاصة بعنصر اليورانيوم ولا تتأثر بالطبيعة الكيميائية والفيزيائية له . وسمى هذه الظاهرة بظاهرة النشاط الإشعاعي .

### 1-1-1 النشاط الإشعاعي Radioactivity

بعد ذلك توصل العالمان كوري وشمث إلى أن الثوريوم Th يطلق إشعاعات شبيهة بالتي يطلقها اليورانيوم . وأن لبعض خامات اليورانيوم الطبيعية نشاط إشعاعي

أعلى من اليورانيوم النقي ومن عينات محضرة مخبرياً لها نفس المكونات الكيميائية .  
 إن التحليل الكيميائي لخامات اليورانيوم الطيعة قد شكل بداية لعلم الكيمياء  
 المشعة والذي أدى إلى اكتشاف عنصر البولونيوم المشع وعنصر الراديوم المشع . وتركز  
 الراديوم مع الباريوم المقصول كيميائياً من خام البتشي بلند (يحتوي هذا الخام الأسود  
 المظهر على  $U_3O_8$  75%) ومن ثم تبين لهم أنه بالإمكان تركيز الراديوم من الباريوم  
 بواسطة عملية البلورة الجزئية للكلوريدات والتي تبقى ملح الراديوم في المحلول .  
 في عام 1902 تمكنت مدام كوري من فصل 100 ملغم من كلوريد الراديوم النقي  
 وقلرت الوزن النري للراديوم بـ 225 . بعد ذلك أعادة تحديد الوزن النري بـ 226.5  
 وحضرت عنصر الراديوم بواسطة التحليل الكهربائي لمصهور كلوريد الراديوم .  
 بين العالم بيكوريل أن اليورانيوم يطلق إشعاعاته إذا كان في الظلام ولم يتعرض إلى  
 أي مصدر طاقة لسنوات طويلة دون أي نقصان في شدة الإشعاعات . وقدر العالم  
 رذرفورد طاقة هذه الإشعاعات . أما مدام كوري وزوجها فلقد قاسوا التأثير الحراري  
 للراديوم والذي يساوي 100 كالوري/ساعة غم راديوم . وهذه الحقيقة دفعت بالعلماء  
 إلى الاهتمام بالراديوم ونشاطه الإشعاعي (حتى أن جريدة سانت لويس في  
 1903/10/4 توقعت استخدام هذه الحقيقة (الظاهرة) في الحروب كوسيلة دمار للعالم) .

## 2-1- خصائص الإشعاعات Radiation Properties

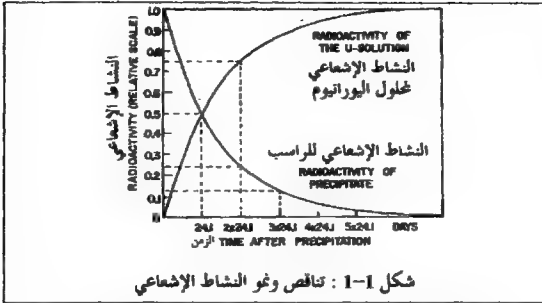
فسر العلماء اختفاء الشحنة من الكشاف الكهربائي نتيجة تعرضه  
 لإشعاعات اليورانيوم بقدرة هذه الإشعاعات على تأيين جزيئات الهواء كما تفعل  
 أشعة إكس في تجربة تومسون . ولقد دفع هذا التفكير العلماء إلى الربط بين شدة  
 الإشعاعات وكمية التأين في الهواء ولاستخدام كمية التأين كوسيلة قياس لشدة

الإشعاعات . وتم قياس تيار التأين في مختبر كوري بواسطة الإلكروميتر .  
 في عام 1899 قام العالم رذرفورد بدراسة خواص الإشعاعات ، ولاحظ أن  
 هناك نوعان من الإشعاعات ، النوع الأول يتم امتصاصه في أجزاء من الألف من  
 سم من الألمنيوم وسماه بأشعة ألفا ( $\alpha$ ) والنوع الثاني يمتص من قبل سمك يقدر بمئة  
 ضعف السمك الأول وسماه بيتا ( $\beta$ ) .  
 أدت تجارب الانحراف في المجال المغناطيسي والكهربائي على أشعة ألفا وبيتا  
 إلى أنها عبارة عن دقائق تسير بسرعة عالية .  
 فدقائق ألفا عبارة عن نوى ذرة  $He^{2+}$  ودقائق بيتا عبارة عن إلكترونات .  
 وربط العلماء بين طبيعة دقائق ألفا وغاز الهيليوم الموجود في خامات اليورانيوم  
 والثوريوم ، وللتأكد من هذا قام العلماء بالتجربة التالية : سمح لدقائق ألفا باخراق  
 وعاء زجاجه رقيق ومفرغ من الهواء وبعد أيام وجد في الوعاء غاز الهيليوم . كما تم  
 اكتشاف أشعة لها خواص الموجات الكهرومغناطيسية وقدرة عالية جداً على  
 الاخراق وطاقة أعلى من أشعة إكس ، سميت بأشعة جاما ( $\gamma$ ) .

## 1-2 التحلل (التفكك) الإشعاعي النووي

### Radioactive Decay

توصل العالمان كروكس وبيكورييل من خلال دراستهم للخواص الكيميائية  
 والمشعة لليورانيوم إلى اكتشاف مهم . فعندما تم ترسيب ملح الكربونات من محلول  
 يحترى على أيونات اليورانيوم  $UO_2^{2+}$  بقيت كربونات اليورانيول ذائبة في المحلول إلا  
 أن الراسب كان له نشاط إشعاعي . والأهم من هذا أن النشاط الإشعاعي للراسب  
 تناقص تدريجياً مع الزمن وتزايد للمحلول مع نفس الزمن (الشكل 1-1).



ونحن نعرف الآن أن النشاط الإشعاعي المقاس كان ناتجاً عن إشعاعات بيتا وجاما وليس ألفا التي تنطلق مباشرة من اليورانيوم . بعد ذلك توصل العالمان رذرفورد وسودي إلى نفس النتيجة السابقة من خلال دراستهم لمحلل الثوريوم ولاحقاً وجد رذرفورد ودورن أنه بالإمكان فصل غازات مشعة من أملاح اليورانيوم والثوريوم . يتناقص النشاط الإشعاعي مع الزمن لهذه الغازات بعد فصلها بينما ينمو نشاط إشعاعي جديد للملح بنفس الطريقة المبينة في شكل (1-1) كما أن سرعة النمو في الملح لا تعتمد على طريقة العمل الكيميائي أو درجة الحرارة ... إلخ . توصل هذان العالمان من خلال هذه الملاحظات إلى أن سبب النشاط الإشعاعي تغيرات في داخل الذرات نفسها وأن ذرات العناصر الأصلية (مثل اليورانيوم U والثوريوم Th) تتحول بسبب التحلل بالنشاط الإشعاعي إلى ذرات لعناصر جديدة .

وسميت العناصر ذات النشاط الإشعاعي بالعناصر المشعة . وللدلالة على العناصر المشعة الناتجة من اليورانيوم والثوريوم استعملت الأحرف X , Y , Z , A , B مع رمز العنصر الأب ، فمثلاً UX عبارة عن عنصر مشع نتج عن تحلل اليورانيوم بالإشعاع أما ThX فيمثل عنصر مشع نتج عن تحلل الثوريوم المشع . UX و ThX عبارة عن

عنصرين لهما خواص كيميائية مختلفة عن العناصر الأصلية ويمكن فصلهم عنهم بواسطة الطرق الكيميائية مثل الترسيب والتطهير .. إلخ . وتحلل النظائر المشعة الابنة أيضاً مكونة عناصر جديدة يرمز لها UY و ThA . تكتب سلسلة التحلل كالاتي :



دلت الدراسات الدقيقة على وجود أنواع الإشعاعات الثلاثة المعروفة بالفا (α) وبيتا (β) وجاما (γ) في الإشعاعات المنطلقة من تحلل العناصر المشعة السابقة الذكر . كما أن سرعة التحلل الإشعاعي لكل وحدة كتلة ثابتة لذلك العنصر المشع مهما كانت طبيعته (حالاته) الكيميائية أو الفيزيائية . ويتم التعبير عن سرعة التحلل بفترة نصف العمر والتي تعرف على أنها الفترة الزمنية اللازمة لتحلل نصف عدد ذرات النظير المشع ، ومهما كان عدد الذرات الموجودة منه في البدء ويرمز لها ب  $t_{1/2}$  . وتراوح فترة نصف العمر للنظائر المشعة المختلفة من أجزاء من الثانية إلى ملايين السنين فمثلاً ل ThA نصف عمر يساوي 0.1 ثانية و ل UX  $t_{1/2} = 2401$  يوم ولليورانيوم  $^{238}_{92}U$   $t_{1/2} = 4.47 \times 10^9$  سنة .

### 3-1 اكتشاف النظائر والعناصر المشعة الموجودة في الطبيعة

#### Naturally Occurring Radioactive Substances

تم التعرف بحلول 1910 على 40 مادة كيميائية مختلفة من خلال طبيعتها الكيميائية وخواصها الإشعاعية وفترة نصف العمر الخاصة بكل منها . وبينت العلاقات الجينية الموجودة في تحلل المواد المشعة أنه بالإمكان تقسيم العناصر المشعة إلى ثلاث سلاسل . اثنتان منها تأتي من اليورانيوم والثالثة من الثوريوم . وأثبت العالم بولتدود أن السلاسل الثلاثة تنتهي بعنصر الرصاص Pb .

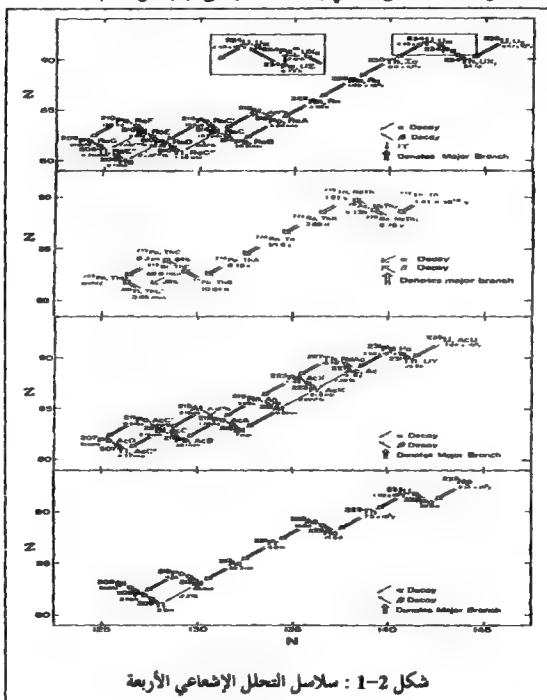
وجد العلماء عند الرجوع إلى الجدول الدوري أن هناك 11 (أحد عشر فراغاً)

ما بين الرصاص واليورانيوم بينما هناك 40 عنصر مشع في سلسلة التحلل من اليورانيوم إلى الرصاص . وما زاد في تعقيد الأمور صعوبة فصل بعض العناصر المشعة عن بعضها البعض بالطرق الكيميائية المعروفة . فعلى سبيل المثال وجد أن للعنصر المشع  $RaD$  نفس خواص  $Pb$  الكيميائية . وفي عام 1913 فسر العالمان فاجان ومودي ما سبق بقولهم أن التحلل الإشعاعي بواسطة دقائق ألفا يؤدي إلى عنصر جديد يقع إلى يسار العنصر الأب بفراغين (نقص بمقدار بروتونين) ، أما التحلل بواسطة دقائق بيتا فيؤدي إلى عنصر جديد يقع إلى يمين العنصر الأب بفراغ واحد (شكل 2-1) أي بزيادة بروتون واحد . إن العناصر المشعة التي تقع في نفس المكان في الجدول الدوري (نفس عدد البروتونات) تتمتع بصفات كيميائية مماثلة . أطلق العالم سودي اسم النظائر على العناصر المشعة التي لها نفس الشخصية الكيميائية . ومن ثم أثبت العالم ثومسون وجود النظائر مستخدماً نفس الجهاز الذي استخدمه في قياس  $\frac{e}{m}$  للإلكترون وأيونات غاز النيون الموجبة . وتبين له من خلال التجربة أن هناك نوعان من أيونات النيون الموجبة لكل منهما كتلة ذرية خاصة به . فالأحدهم عدد كتلي 20 وللآخر 22 . وإن نسبة وجود النظير 20 حوالي 90% أما النظير 22 فنسبته 10% .

ويمكننا القول بأن العناصر الكيميائية قد تتكون من أكثر من نوع من الذرات المختلفة عن بعضها في الكتلة الذرية ولكن لها نفس الصفات الكيميائية (نفس عدد البروتونات) . ومن هنا نقول أن العناصر المشعة 40 هي عبارة عن نظائر لإحدى عشر عنصراً كيميائياً مختلفاً . ويكتب النظير كالأتي  ${}^A_Z X$  ، حيث أن  $X$  ترمز للعنصر بينما  $A$  هو العدد الكتلي و  $Z$  هو العدد الذري .

وإذا دققنا النظر في السلاسل المشعة ، نجد أن أحدها يأتي من نظير اليورانيوم  ${}^{238}U$  الذي عمر ب 14 تحلل (8 منها بإطلاق دقائق  $\alpha$  و 6 منها بإطلاق دقائق بيتا) إلى أن

تنتهي السلسلة بنظير الرصاص  $^{206}\text{Pb}$  المستقر ويومز هذه السلسلة بـ  $4n+2$  (حيث أن حاصل قسمة 238 على 4 يعطي رقماً صحيحاً ويتبقى 2) (شكل 1-2).



أما السلسلة الثانية فهي سلسلة الثوريوم  $^{232}\text{Th}$  ، ويرمز لها بـ  $4n$  ، وتنتهي هذه السلسلة بنظير الرصاص  $^{208}\text{Pb}$  المستقر . والسلسلة الأخيرة هي سلسلة اليورانيوم  $^{238}\text{U}$  التي تعرف بسلسلة  $4n+2$  . كما أنها تنتهي بنظير الرصاص المستقر  $^{208}\text{Pb}$  .

لاحظ العلماء في السلاسل الثلاثة وجود ما يسمى بالتحلل المتفرع نتيجة التقدم العلمي في أجهزة القياس والكشف ، مما سهل على العلماء إمكانية قياس التحللات الفرعية بدقة أعلى . فعلى سبيل المثال اكتشف في عام 1953 في سلسلة  $^{235}\text{U}$  تحلل الفرانسيوم  $^{223}\text{Fr}$  إلى راديوم  $^{223}\text{Ra}$  بنسبة 99.995% وإلى أستانين  $^{219}\text{At}$  بنسبة 0.005% .

كما وجد في كل سلسلة من السلاسل الثلاث نظير لعنصر الرادون ( $Z=86$ ) وهم  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  . والرادون أحد العناصر الثقيلة وقد ساعد وجوده في السلاسل على فهم ظاهرة النشاط الإشعاعي ، وذلك من خلال طبيعته الغازية التي أتاحت للعلماء إمكانية فصله ومن ثم الحصول منه على باقي عناصر السلسلة .

#### 4-1 عناصر مشعة أخرى موجودة في الطبيعة .

##### Other Naturally Occuring Radioactivities

منذ اكتشاف النشاط الإشعاعي تم فحص جميع العناصر الموجودة في الطبيعة لمعرفة إذا كان لديها نشاط إشعاعي أم لا .

فاكتشف العالمان لمبل و وود عام 1906 نشاطاً إشعاعياً ضعيفاً في البوتاسيوم والروبيديوم وبعد ذلك بست وعشرين عاماً اكتشف العالمان هفزي وباهل عام 1932 أن هناك نشاطاً إشعاعياً في السماريوم واكتشف حديثاً عدد من النظائر



المشعة الموجودة في الطبيعة (جدول 1-1) . نرى من الجدول السابق أن النظير المشع لبعض العناصر موجود بنسبة ضئيلة في الطبيعة وفي حالات أخرى تكون فترة نصف العمر للنظير المشع طويلة جداً . هذان العاملان يؤديان إلى نشاط ضعيف للعينة المدروسة مما يصعب عملية الكشف عن هذا النشاط ، ويعوق العلماء أنه بالإمكان اكتشاف نظائر مشعة أخرى في الطبيعة كلما تقدمت أجهزة الكشف عند النشاط الإشعاعي . ويواجه العلماء مشكلة الإشعاع الطبيعي العام الذي يصعب على العلماء قياس النشاط الإشعاعي الضعيف لبعض العينات .

المادة المشعة Active Substance	نوع التحلل Type of Disintegration	نصف العمر بالثانية Half Life (y)	نسبة النظير Isotopic Abundance(%)	نواتج التحلل المستقرة Stable Disintegration Products
<sup>40</sup> K	$\beta^-$ , EC, $\beta^+$	$1.28 \times 10^9$	0.0117	<sup>40</sup> Ca, <sup>40</sup> Ar
<sup>87</sup> Rb	$\beta^-$	$4.8 \times 10^{10}$	27.83	<sup>87</sup> Sr
<sup>113</sup> Cd	$\beta^-$	$9 \times 10^{15}$	12.2	<sup>113</sup> In
<sup>115</sup> In	$\beta^-$	$5.1 \times 10^{14}$	95.7	<sup>115</sup> Sn
<sup>138</sup> La	EC, $\beta^-$	$1.1 \times 10^{11}$	0.089	<sup>138</sup> Ba, <sup>138</sup> Ce
<sup>144</sup> Nd	$\alpha$	$2.1 \times 10^{15}$	23.8	<sup>140</sup> Ce
<sup>147</sup> Sm	$\alpha$	$1.06 \times 10^{11}$	15.1	<sup>143</sup> Nd
<sup>148</sup> Sm	$\alpha$	$8 \times 10^{15}$	11.3	<sup>144</sup> Nd
<sup>152</sup> Gd	$\alpha$	$1.1 \times 10^{14}$	0.20	<sup>148</sup> Sm
<sup>176</sup> Lu	$\beta^-$	$3.6 \times 10^{10}$	2.61	<sup>176</sup> Hf
<sup>174</sup> Hf	$\alpha$	$2.0 \times 10^{15}$	0.16	<sup>170</sup> Yb
<sup>187</sup> Re	$\beta^-$	$4 \times 10^{10}$	62.60	<sup>187</sup> Os
<sup>190</sup> Pt	$\alpha$	$6 \times 10^{11}$	0.013	<sup>186</sup> Os

جدول 1-1 : عناصر مشعة أخرى موجودة في الطبيعة .

وينتج الإشعاع الطبيعي عن وجود اليورانيوم والثوريوم والپوتاسيوم ... إلخ وعن وجود الأشعة الكونية بشكل أكبر . تصل الأشعة الكونية إلى جميع أنحاء الكرة

الأرضية وتزداد شدتها كلما ارتفعنا إلى أعلى وتقل في الكهوف والمناجم . وفي السنين الأخيرة ازداد الإشعاع الطبيعي العام نتيجة التفجيرات النووية وتسرب الإشعاعات من المخطات النووية مثل تشرنوبل (أوكرانيا) وجزيرة الأميال الثلاثة (الولايات المتحدة) .

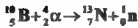
## 5-1 العناصر المشعة المصنعة

### Artificially Produced Radioactive Substances

أعلن العالمان أي كوري (أبنة ماري كوري) وف. جوليوت في عام 1934 أنه بالإمكان إكساب البورون والألمنيوم المستقرين نشاطاً إشعاعياً وذلك بقذفهم بدقائق  $\alpha$  المنبعثة من البولونيوم المشع .

شكل هذا الاكتشاف بداية لتصنيع النظائر المشعة . كان الهدف الأول من تجربتهم هو إنتاج البوزترون في المختبر وذلك بعد أن اكتشف في الأشعة الكونية من قبل العالم م. أندرسون . وما أثار دهشتهم أن البورون والألمنيوم المقذوفان بدقائق  $\alpha$  استمرا في إطلاق البوزترونات حتى بعد إبعاد مصدر دقائق  $\alpha$  (البولونيوم) عنهم، وأن النشاط الإشعاعي المكتسب يتناقص مع الزمن وينصف عمر  $t_{1/2}$  خاص لكل منهما (14 دقيقة للبورون و 3.25 دقيقة للألمنيوم) .

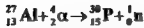
بينت الأبحاث في ما بعد أنه قد حصل تفاعل نووي لكل من البورون والألمنيوم ففي البورون حدث ما يلي :



ويتحلل نظير  $^{13}_7\text{N}$  المشع مطلقاً بوزترونات  $\beta^+$  كما يلي :



أما في الألومنيوم فحدث الآتي :



ويتحلل نظير  $^{30}_{15}\text{P}$  المشع مطلقاً بوزترونات  $\beta^+$  حسب المعادلة التالية :



بعد ذلك مارعت العديد من المختبرات إلى القيام بجارب مشابهة وذلك بتصميم أجهزة جديدة تهدف إلى تسريع أيونات الهيدروجين والهيليوم الموجبة وإكسابها طاقة كافية لإحداث التفاعلات النووية . وساعد في هذا اكتشاف النيوترون عام 1932 والديتريوم 1933 مما وفر دقيقتان جديدتان ، فاستخدما كمقذوفات بعد ذلك . ففي غضون 3 سنين ارتفع عدد النظائر المشعة المصنعة إلى 200 وفي غضون 20 سنة التالية ازداد العدد إلى 1000 . ويصل في عام 1978 إلى أكثر من 2500 . وهذا العدد في ازدياد مستمر كل شهر تقريباً .

إن اكتشاف الانشطار النووي في عام 1938 من قبل العالمين هان وستراسمان ساهم بقوة في إنتاج النظائر المشعة . كما أدت التفاعلات القوية التي بنيت فيما بعد إلى إنتاج بعض النظائر المشعة بكميات كبيرة وإلى التوسع في استخدامها في حقول الكيمياء والفيزياء والأحياء والطب والزراعة والصناعة . ملحق أ يحتوي على جميع النظائر المستقرة والمشعة المعروفة .

## 1-6 العناصر المصنعة وسلسلة $4n+1$ المعروفة

### Sythetic Elements and the $4n+1$ series

لقد تمكن العلماء من تحضير نظائر مشعة للعناصر المعروفة وللعناصر غير المعروفة ، وهذه العناصر غير المعروفة لا توجد أصلاً في الطبيعة ، وفي وقتنا هذا

يمكن تحضير كميات صغيرة من هذه العناصر الجديدة . أما البلوتونيوم فلقد حضر العلماء كميات كبيرة منه تقدر بالكيلوغرامات وذلك لاستخدامه في القنبلة الذرية. وبحلول 2002 بلغ عدد العناصر التي تأتي بعد اليورانيوم ( $Z > 92$ ) بـ 20 عنصر، بالإضافة إلى التكنيشيوم ( $Z=43$ ) والبروميثيوم ( $Z=61$ ) .

من العناصر الثقيلة المشعة التي تم تحضيرها عدد لا بأس به من العناصر المشعة المكونة لسلسلة  $4n+1$  والتي لا توجد في الطبيعة (شكل 2-1) . وبالنظر إلى الشكل (2-1) نرى أن هذه السلسلة تشبه السلاسل الثلاث الأخرى وأنها تنتهي بنظير الزيموث المستقر  $^{209}\text{Bi}$  . ويعزى عدم وجود هذه السلسلة لنصف عُمر  $^{237}\text{Np}$  ( $t_{1/2}$ ) والذي يساوي  $2.1 \times 10^6$  سنة وهذه المدة الزمنية قصيرة جداً بالمقارنة مع عُمر الكرة الأرضية .

## 7-1 العناصر السوبر ثقيلة (أو الفوق ثقيلة)

### Superheavy Elements

إذا أمعنا النظر في العناصر التي تأتي بعد اليورانيوم نرى أنها ذات نصف عُمر لا يسمح لها بالوجود في وقتنا الحاضر وذلك بالمقارنة بعُمر النظام الشمسي والذي يقدر بعدة بلايين من السنين ، ما عدا نظير  $^{244}\text{Pu}$  (سنة  $8.1 \times 10^7 = t_{1/2}$ ) الذي يوجد بتركيز صغير جداً . وبالنظر إلى قيم نصف العُمر للعناصر السابقة نرى أن نصف العُمر يقل كلما ابتعدنا عن اليورانيوم ، إلا أنه في السنين الأخيرة ظهرت عدة آراء مبنية على حسابات نظرية لبنية النواة تقول بوجود جزيرة استقرار جديدة بعد اليورانيوم وتقع ما بين العدد الذري 110 إلى 114 والعدد الكتلي 300 . جرت محاولات كثيرة للكشف عن هذه العناصر في الطبيعة ولتصنيعها من خلال التفاعلات النووية إلا أن هذه المحاولات باءت بالفشل إلى وقتنا هذا .

## الفصل الثاني

### بنية النواة وطاقة الربط النووي

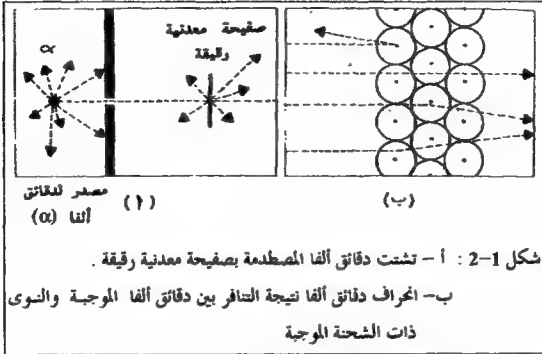
#### NUCLEAR COMPOSITION AND BINDING ENERGY

##### 2-1 بنية الذرة Atomic Structure

كان التفكير السائد قبل اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي أن العاصر الكيميائية تحافظ على هويتها من خلال التغيرات الكيميائية والفيزيائية التي تمر بها. وتبين بعد ذلك أن التحلل بالنشاط الإشعاعي يغير العاصر إلى عاصر آخر. توصل العالم تومسون وعلماء آخرون بمن خلال تجارب التشتت لأشعة أكس وللإلكترونات على المادة، إلى أن عدد الإلكترونات في كل ذرة يساوي تقريباً الوزن الذري (تبين في ما بعد عام 1911 من قبل العالم باركلا أن عدد الإلكترونات يساوي تقريباً نصف الوزن الذري) وبعد أن قدر تومسون كتلة الإلكترون بـ  $\frac{1}{2000}$  من كتلة ذرة الهيدروجين. افترض العلماء أن معظم كتلة الذرة تتركز في منطقة ذات شحنة موجبة. والسؤال المتبقي هو كيف تتوزع الشحنات الموجبة والسالبة داخل الذرة؟

##### 2-2 تشتت دقائق ألفا Alpha-particle Scattering

قام العالم رذرفورد بتجربة التشتت لدقائق ألفا من قبل صفيحة معدنية رقيقة. وكانت توقعاته أن تمر دقائق  $\alpha$  عبر الصفيحة الرقيقة دون أي تغيير في مسارها، مما يتفق مع الاعتقاد السائد آنذاك بالتوزيع المنتظم للشحنات الموجبة والسالبة في الذرة. وعند البحث تبين أن بعض دقائق ألفا تشتت بزاوية كبيرة. وكان هذا مبعث دهشة لرذرفورد. وكان الأكثر إثارة للدهشة أن بعض الدقائق انقلبت على أعقابها وانعكس مسارها بصورة كلية، مما يعني أنها قد اصطدمت بمنطقة موجبة الشحنة ذات كتلة كبيرة نسبياً (الشكل 2-1).



شكل 2-1 : أ - تشتت دقائق ألفا المصطدمة بصفحة معدنية رقيقة .

ب- انحراف دقائق ألفا نتيجة التناثر بين دقائق ألفا الموجية والنوى ذات الشحنة الموجبة

وفيما عدا ذلك فإن معظم دقائق ألفا مرت عبر الصفحة دون أي تغيير يذكر . وقد استنتج العالم رذرفورد أن هناك منطقة في الذرة صغيرة جداً ولكن كثافتها عالية وشحنتها موجبة ، وسماها بالنواة وفسر أنواع التشتت السابقة على أساس قوى الجذب والتناثر الإلكتروستاتيكية . فلو افترضنا أن شحنة ذرة الصفحة المركزية  $Ze$  وشحنة دقيقة ألفا ( $Z_{\alpha}e=2e$ ) على أنهما نقطة مشحونة وأن المسافة بينهما  $d$  فتصبح القوة بينهما حسب قانون كولومب  $F = Z_{\alpha}e \cdot Ze / d^2$  . وبما أن نواة ذرة الصفحة (كنواة ذرة النذهب) ثقيلة بما فيه الكفاية أمكننا اعتبارها ثابتة (ساكنة) في لحظة التصادم مع دقائق ألفا المتحركة . وقد بين رذرفورد أن مسار دقيقة ألفا في مجال النواة عبارة عن قطع ناقص وأن النواة في البؤرة الخارجية . وبالاعتماد على قوانين حفظ الزخم والطاقة وعلى الصفات الهندسية للقطع الناقص اشتق العالم رذرفورد معادلة التشتت والتي تربط ما بين عدد  $n(\theta)$  دقائق ألفا الواقعة على وحدة المساحة والتي تبعد مسافة  $r$  عن نقطة

التشتت وزاوية التشتت  $\theta$  (هي الزاوية التي تقع بين اتجاه السقوط والديقة المشتت) .

$$n(\theta) = n_0 \frac{Nt}{16r^2} \left( \frac{Z_c \cdot Z_{\alpha}}{\frac{1}{2} M_{\alpha} V_{\alpha}^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad \dots (2-1)$$

حيث أن  $n_0$  هو عدد دقائق  $\alpha$  الساقطة ، و  $t$  هو سمك الصفيحة المعدنية المشتتة و  $N$  هو عدد الأنوية في وحدة الحجم للمادة المشتتة و  $M_{\alpha}$  هي كتلة دقيقة  $\alpha$  و  $V_{\alpha}$  هي سرعة دقيقة  $\alpha$  .

أخضع العالمان جانيجر ومارسندن للمعادلة (2-1) لعدة تجارب فبين لهم أن عدد الدقائق المشتتة في وحدة المساحة يتناسب عكسياً مع القوة الرابعة لجيب نصف زاوية التشتت ومع القوة الزمنية لطاقة دقيقة  $\alpha$  وذلك في حال أن العناصر الثقيلة هي المكونة للصفيحة المعدنية. أما في حال العناصر الخفيفة فيجب أن ندخل على النظرية التعديل التالي : لا يمكن أن نفرض أن أنوية الصفيحة المعدنية المشتتة ثابتة (ساكنة) في لحظة التصادم .

### 2-3 شحنة النواة والعدد الذري

#### Nuclear Charge and Atomic Number

أصبح بالإمكان قياس مقدار الشحنة النووية لنرة عنصر ما من خلال تجارب التشتت وذلك لأن شدة التشتت تتناسب مع مربع الشحنة النووية . وقد أدى هذا إلى الربط ما بين العدد الذري  $Z$  المستخدم في تحديد موقع العنصر في الجدول الدوري وشحنة النواة . بعد ذلك وجد العالم هنري موزلي في عام 1914 علاقة طردية بين عدد سماه بالعدد الذري للعنصر وتردد أشعة أكس  $K_{\alpha}$  المنبعثة منه نتيجة اصطدام الإلكترونات بأنود يُعد من العنصر ويستخدم في أنبوب أشعة أكس .

وعرف العدد الذري بأنه عدد وحدات الشحنة في النواة أو هو عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة والموجودة خارج النواة . بعد ذلك تابع العلماء من بور إلى شرودنجر إلى هايزنبرغ دراساتهم لفهم الذرة وتركيبها .

## 2-4 بنية النواة Composition of Nuclei

### ( أ ) كثافة وحجم النواة Nuclear Size and Density

توصل العلماء من خلال تجارب رذرفورد إلى معرفة أحجام الأنوية وأن قطرها يقع في حدود  $10^{-12}$  سم ، أي أنها  $10^{-4}$  مرة أصغر من الذرة . وبما أن النواة تحتوي على كتلة الذرة فإن كثافتها أكبر بكثير من كثافة المواد المعروفة وتساوي تقريباً  $10^{14}$  غم/سم<sup>3</sup> (أو  $10^8$  طن/سم<sup>3</sup>) .

(ب) فرضية الإلكترون - البروتون Proton-Electron Hypothesis  
بما أن شحنات الأنوية هي مضاعفات (أرقام) صحيحة وأن الكتل هي مضاعفات لشحنة وكتلة البروتون تقريباً ، كان من الطبيعي أن يفرض العلماء بأن جميع الأنوية مبنية من البروتونات . اعتقد العلماء قبل اكتشاف النيوترونات بأن العدد الكتلي A للذرة ما يساوي عدد البروتونات (للدلالة على الكتلة) و (A-Z) هو عدد الإلكترونات (للدلالة على الشحنة الموجبة) . نجم عن هذه الفرضية عدة مشاكل منها مشكلة وجود الإلكترون في النواة ، فإذا وجد في النواة كان له طول موجة دي بروغلي  $\left( \lambda = \frac{h}{mv} \right)$  والذي يساوي قطر النواة أو أصغر منه . فالطاقة الحركية المحسوبة على هذا الأساس تساوي أكثر من طاقة دقائق بيتا المنطلقة من النواة . مما جعل العلماء أن يصرفوا النظر عن فكرة وجود الإلكترونات الحرة في النواة وأن يفكروا بوجود دقيقة جديدة سماها رذرفورد عام 1920 بالنيوترون مكونة من بروتون وإلكترون .



### ج) اكتشاف النيوترون Neutron Discovery

قام العلماء بعدة محاولات فاشلة لإثبات وجود النيوترون بعد عام 1920 إلى أن جاء العالم شادوك عام 1932 وأثبت أن الدقائق الناتجة والمنطلقة بسرعة من تفاعل دقائق  $\alpha$  والبروتون هي نيوترونات ذات شحنة تساوي صفر وكتلة مساوية تقريباً لكتلة البروتون (أكثر من كتلة ذرة الهيدروجين بحوالي 0.08٪). وبما أن النيوترونات معادلة الشحنة فإنها لا يمكن أن تأين المواد نتيجة مرورها بها وأن ما يحدث هو عملية تصادم كلي بينها وبين الذرات القريبة في الكتلة منها مثل ذرات الهيدروجين ، ولقد استدل العلماء على هذا بعد أن مرت النيوترونات في شمع الرافين وتنتج عن ذلك غاز الهيدروجين .

لا يمكن للنيوترونات أن توجد حرة فهي غير مستقرة وتتحلل إلى بروتونات وإلكترونات (فترة نصف العمر 11 دقيقة) .

### د ) فرضية البروتون - النيوترون Proton-Neutron Hypothesis

جاءت هذه الفرضية بعد فشل فرضية الإلكترون - البروتون . فالفرضية الجديدة تقول بأن عدد البروتونات في النواة يساوي العدد الذري (Z) وأن عدد البروتونات والنيوترونات الكلي (عدد النيوكلين) يساوي العدد الكتلي A (النيوكلين تعبر يعني بروتوناً أو نيوترونًا) . فتواة  $^{14}\text{N}$  تحتوي على سبع بروتونات وسبع نيوترونات .

تتمد الأعداد الذرية للعناصر المعروفة من 1 للهيدروجين إلى 109 لأثقل عنصر في الجدول الدوري . أما عدد النيوترونات فيتراوح ما بين 0 إلى 159 والعدد الكتلي من 1 إلى 263 .

يسمى الفرق ما بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات  $N-Z$  أو  $(A-2Z)$  بالزيادة النيوترونية (أو الرقم النظيري) .

### هـ) النظائر والنوى Isotopes and Nuclides

تعرف النظائر بأنها ذرات عنصر واحد تختلف عن بعضها البعض في عدد النيوترونات .

فعلى سبيل المثال لليورانيوم في الطبيعة نظيران مشعان يُعبر عنهما الرمز  $^{235}_{92}\text{U}$  و  $^{238}_{92}\text{U}$

وباستخدام أجهزة مطياف الكتلة أثبت أن العناصر ما بين  $Z = 1$  و  $83$  لها في المعدل أكثر من ثلاثة نظائر ، فعلى سبيل المثال للعناصر التالية البريليوم ، الفسفور ، الزرنيخ والبزموت نظير مستقر واحد في الطبيعة أما القصدير فله 10 نظائر مستقرة في الطبيعة .

توجد نظائر العناصر المستقرة بنسب ثابتة مع بعضها البعض ، ولهذا فإن الأوزان الذرية المقاسة لعنصر ما باستخدام مصادر أو عينات مختلفة تتفق مع بعضها البعض ضمن الخطأ في التجارب . وقد شذت حالتان عن هذه القاعدة ، أولهما نسبة وجود نظائر الرصاص الصغيرة وخاصة في خامات اليورانيوم والثوريوم . فبالاعتماد على عمر ومكونات الخامات فإن نهايات السلاسل المشعة الثلاثة  $^{206}\text{Pb}$  و  $^{207}\text{Pb}$  و  $^{208}\text{Pb}$  والنظير  $^{204}\text{Pb}$  ، الذي لا يأتي من مصدر مشع ، قد تتواجد بنسب مختلفة . وثانيها نسبة النظير  $^{87}\text{Sr}$  الذي يتواجد بنسبة عالية في الصخور التي تحتوي على الراديوم وذلك لأن  $^{87}\text{Sr}$

ينتج أيضاً عن تحلل  $^{87}\text{Rb}$  الطبيعي المشع . أما ثالثها فهو اختلاف نسبة  $\frac{^4\text{He}}{^3\text{He}}$  في

حقول الغاز الطبيعي مع تلك الموجودة في الجو . ورابعها نسبة  $^2\text{H}/^1\text{H}$  في الماء ، ويعزى هذا إلى انخفاض ضغط بخار الماء الثقيل بالمقارنة مع الماء العادي . فمياه البحر الميت تحتوي على نسبة أعلى من الديوتريوم  $^2\text{H}$  . فالمياه التي تحتوي على نسبة من  $^2\text{H}$  أعلى من الطبيعي وجد أنها تحتوي على نسبة أعلى من الطبيعي لـ  $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$  . والسبب الآخر

الذي يساعد في الاختلاف القليل في نسبة النظائر هو اعتماد الاتزان على الأوزان الجزيئية للمفاعلات مما قد يؤدي إلى زيادة في نسبة أحد النظائر من خلال التفاعلات في الطبيعة . فترداد نسبة  $^{13}\text{C}$  في الحجر الجيري نتيجة الاتزان في التفاعل التالية :



يُزاح إلى اليمين أكثر في حال  $^{13}\text{CO}_2$  منه في حال  $^{12}\text{CO}_2$  .

استخدم العلماء تعبير النظير بشكل واسع للدلالة على أي نويدة مشعة أم مستقرة . وفي الآونة الأخيرة درج اسم النويدة بشكل أوسع للدلالة على ذرة نواتها تحتوي على عدد معين من البروتونات والنيوترونات .

( و ) إيزوبارز وإيزوتونز وإيزومرز

Isobars, Isotones and Isomers

تسمى الذرات التي لها نفس العدد الكتلي ولكنها تختلف بالعدد الذري بالأيزوبارز ومن الأمثلة على ذلك  $^{76}_{34}\text{Se}$  ،  $^{76}_{32}\text{Ge}$  و  $^{130}_{56}\text{Ba}$  ،  $^{130}_{54}\text{Xe}$  ،  $^{130}_{52}\text{Te}$  . أم الذرات التي لها نفس عد النيوترونات ولكنها تختلف في العدد الكتلي بالأيزوتونز ومن الأمثلة على ذلك  $^{30}_{14}\text{Si}$  ،  $^{31}_{15}\text{P}$  ،  $^{32}_{16}\text{S}$  حيث أن عدد النيوترونات في كل منها 16 .

اكتشف العالم هاهن في 1922 أن هناك ذرتان مشعّتان  $\text{UX}_2$  و  $\text{UZ}$  في سلسلة  $^{238}_{92}\text{U}$  المشعة ، لهما نفس العدد الكتلي (234) والعدد الذري (91) ولكنها تختلف في الخواص الإشعاعية (شكل 2-1) . سميت هاتان الذرتان بالأيزومرز وهذه الخاصة بالأيزومرز . بعد ذلك بـ 15 عاماً اكتشف في  $^{80}\text{Br}$  هذه الخاصية ومن ذلك الوقت اكتشف العلماء أن هناك 500 زوج من الأيزومرز . وفسر العلماء هذه الخاصية على أساس وجود النواة في مستويات طاقة مختلفة في كل من الأيزومرز ، كما أن لكل مستوى طاقة وفرة حياة خاصة به ما عدا المستوى الأرضي إذا كان مستقراً . ومن ثم تبين للعلماء أن هناك بعض الحالات التي يوجد فيها أكثر من زوج من الأيزومرز مثل  $^{124}_{51}\text{Sb}^{(g)}$  (60 يوم  $t_{1/2}$ ) ،  $^{124}_{51}\text{Sb}^{m1}$  (1.6 دقيقة  $t_{1/2}$ ) و  $^{124}_{51}\text{Sb}^{m2}$  (20 دقيقة  $t_{1/2}$ ) ، وترمز g للمستوى الأرضي أما  $m_1$  فترمز لطاقة تهيج المستوى الأيزومري الأول و  $m_2$  لطاقة تهيج المستوى الأيزومري الثاني . أي أن طاقة  $m_2$  هي أكثر من طاقة  $m_1$  و  $m_1$  أكثر من طاقة g.

## 5-2 أنماط الاستقرار النووي Nuclear Stability

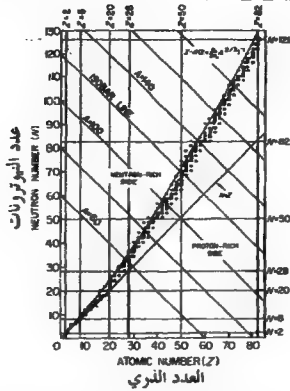
هناك حوالي 275 نواة مختلفة لم تظهر أي نشاط إشعاعي ولهذا اعتبرت مستقرة نحو التحلل بالنشاط الإشعاعي . وعند النظر إلى أنويتها (نوى) تبين أن 60% منها تحوي على عدد زوجي من البروتونات وعدد زوجي من النيوترونات (زوجي - زوجي) أو (even-even) باللغة الإنجليزية التي تختصر إلى (e-e) . أما 40% المتبقية فتتقسم تقريباً بالتساوي ما بين نوى لها عدد زوجي من البروتونات وعدد فردي من النيوترونات (even-odd أو e-o) ونوى لها عدد فردي من البروتونات وعدد زوجي من النيوترونات (odd-even أو o-e) . وهناك فقط ست نوى لها عدد فردي من البروتونات والنيوترونات (odd-odd أو o-o) وهي  $^2_1\text{H}$  و  $^6_3\text{Li}$  و  $^{10}_5\text{B}$  و  $^{14}_7\text{N}$  و  $^{30}_{15}\text{V}$  و  $^{180}_{73}\text{Ta}$  ومن الملاحظ أن النوى الأربع الأولى من العناصر الخفيفة وأن لها نسبة وجود في الطبيعة تتراوح من 0.0148% لـ  $^2_1\text{H}$  و 7.5% لـ  $^6_3\text{Li}$  و 19.8% لـ  $^{10}_5\text{B}$  إلى 99.63% لـ  $^{14}_7\text{N}$  . أما  $^{30}_{15}\text{V}$  فله نسبة وجود 0.250% ولـ  $^{180}_{73}\text{Ta}$  نسبة وجود 0.01% .

ويلاحظ مما سبق أن النوى التي لها عدد زوجي من البروتونات والنيوترونات تتمتع باستقرار أكثر من تلك التي لها عدد فردي من البروتونات أو النيوترونات . ومن أجل التأكد من صحة هذا وجب علينا دراسة بعض العناصر وعدد نظائرها المستقرة (جدول 1-2) . للعناصر ذات العدد الذري الزوجي عدد من النظائر المستقرة لا يقل عن أربعة ، فعلى سبيل المثال ، لعنصر القصدير ( $Z = 50$ ) عشر نظائر مستقرة أما الكاديوم ( $Z = 48$ ) والتيربيوم ( $Z = 52$ ) فلكل منهما ثمان نظائر مستقرة . ونجد في المقابل أن للفضة ( $Z = 47$ ) ولألثيمون ( $Z = 51$ ) نظيران مستقران فقط . وأن للروديوم ( $Z = 45$ ) ولإندريوم ( $Z = 49$ ) ولليود ( $Z = 53$ ) نظير مستقر واحد .

عدد البروتونات أو النيوترونات Number of protons or neutrons	عدد النوى المستقرة التي لها عدد Number of stable nuclei with number of	
	نظائر Protons (isotopes)	أيزوتونات Neutrons (isotones)
19	2 (K)	0
20	6 (Ca)	5
21	1 (Sc)	0
27	1 (Co)	1
28	5 (Ni)	5
29	2 (Cu)	1
48	8 (Cd)	4
49	1 (In)	1
50	10 (Sn)	5
51	2 (Sb)	1
52	8 (Te)	4
81	2 (Tl)	1
82	4 (Pb)	8
83	1 (Bi)	1

جدول 1-2 : عدد النوى المستقرة لأعداد مختلفة من  $Z$  و  $N$  .

وهناك عدة أمثلة على الاستقرار الزائد الذي ينتج عن وجود عدد زوجي من النيوكليونات (شكل 2-2) وإذا أمعنا النظر في الشكل (2-2) نرى أن عدد النظائر المستقرة يزداد عند  $N$  و  $Z$  2 ، 8 ، 20 ، 28 ... إلخ. إن هذه الأعداد لـ  $N$  و  $Z$  لم تأتي من فراغ بل تمثل تركيب نووي مستقر للبروتونات والنيوترونات والذي سوف يدرس فيما بعد .



شكل 2-2 : النظائر المستقرة مع اختلاف  $Z$  و  $N$

إن الخط المنحني في الشكل (2-2) هو خط الاستقرار المحسوب نظرياً على أساس نموذج قطرة السائل للنواة والذي سوف نتطرق له لاحقاً . نجد أن للعناصر ذات العدد الفسدي من البروتونات نظير أو نظيران مستقران، لأحدهما أو لكلاهما عدد زوجي من النيوترونات وعدد النظائر المستقرة ذات العدد الزوجي من البروتونات والعدد الزوجي من النيوترونات أكثر من تلك التي لها عدد زوجي من البروتونات وعدد فردي من النيوترونات ، فعلى سبيل المثال للقصدير  $Sn$  ( $Z = 50$ ) سبعة نظائر مستقرة من نوع زوجي - زوجي ( $e-e$ ) وثلاثة من نوع زوجي - فردي ( $e-o$ ) . كما نجد أيضاً أن للنوى ذات العدد الزوجي من النيوترونات نظير أو نظيران مستقران . وقد فسر العلماء الاستقرار

الناجم عن العدد الزوجي من البروتونات والنيوترونات على أساس طاقة الاستقرار الناجمة عن تكوين أزواج من النيوكليونات المتشابهة تماماً كما يحدث في الذرة عندما تكون الإلكترونات أزواجاً . فإذا كان في النواة عدد زوجي من البروتونات فإنه يمكن أن تتواجد على شكل أزواج . أما إذا كان عدد البروتونات فردي فإنه لابد أن يوجد أحد البروتونات في الحالة المنفردة أو غير المزدوجة .

ساهمت الزيادة في الاستقرار الناجمة عن وجود البروتونات الزوجية على هيئة أزواج في قابلية العناصر على استيعاب مدى أكبر من النيوترونات وهذا ما حصل في نظائر القصدير بالمقارنة مع الأنديموم والأنتيمون . كما أن وجود النيوترونات على هيئة أزواج يساهم في الاستقرار ، فالنواة ذات العدد الزوجي - الزوجي يكون فيها جميع البروتونات والنيوترونات على شكل أزواج وهذا يعني أنها في حالة استقرار . وفي العناصر ذات العدد الذري الزوجي وعدد النيوترونات الفردي نوع من الاستقرار الناجم عن وجود أزواج من البروتونات ، أما العناصر ذات العدد الذري الفردي فلا بد أن يأتيها الاستقرار من عدد النيوترونات ، فإذا كان عددها زوجي كانت مستقرة ، أما إذا كان العدد فردياً كانت ذات نشاط إشعاعي إلا في بعض الحالات النادرة الست التي تم ذكرها .

ومن الملفت للنظر أن عدد النوى المستقرة من نوع زوجي - فردي (e-o) وفردي - زوجي (o-e) متساو تقريباً وهذا يعني أن تزواج البروتونات أو النيوترونات يؤدي إلى نفس الدرجة من الاستقرار تقريباً .

## 2-6 نسبة النيوترونات إلى البروتونات

### Neutron to Proton Ratio

نلاحظ من الشكل (2-2) ، الذي يمثل العلاقة ما بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات في النوى المستقرة ، أن الاستقرار في العناصر الخفيفة يحدث عندما يتساوى تقريباً عدد البروتونات والنيوترونات ( $N=Z$ ) وذلك من  $Z=1$  إلى  $Z=20$  ، وإذا تجاوزنا  $Z=20$  نجد دائماً أن عدد النيوترونات أعلى من عدد البروتونات ، وأن نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النظائر المستقرة تزداد إلى أن تصل 1.5 في البزموت في أعلى حزمة الاستقرار . فكل النوى التي تأتي بعد البزموت غير مستقرة نحو التحلل الإشعاعي بدقائق ألفا وأن بعض هذه النوى غير مستقرة نحو التحلل بدقائق بيتا أيضاً .

وقد فسر هذا لاحقاً على أساس زيادة عدد البروتونات يتبعه زيادة في قوى التنافر بينها في داخل النواة ، مما يستدعي وجود نيوترونات أكثر للتغلب على قوى التنافر وللإبقاء على وحدة النواة . والنظائر الواقعة خارج حزمة الاستقرار هي نظائر مشعة تتحلل لتعطي نوى تمتلك نسبة مستقرة من النيوترونات إلى البروتونات. فالنظائر الواقعة فوق حزمة الاستقرار لديها  $\frac{N}{Z}$  أعلى من نسبة الاستقرار ولهذا تسمى نظائر غنية بالنيوترونات ويتحتم عليها أن تفقد نيوترونات أو أن تقلل النيوترونات وتزيد البروتونات . ومن هنا يفسر تحلل نظير اليود - 137 بخسارة نيوترون :



كما أن تحلل نظير الكربون - 14 يتم بتحول أحد النيوترونات في  ${}^{14}_6\text{C}$



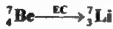
إلى بروتون في  ${}^{14}_7\text{N}$



ويحدث العكس في النظائر الواقعة تحت حزمة الاستقرار ، حيث أن نسبة  $\frac{N}{Z}$  أقل من نسبة الاستقرار وتسمى نظائر غنية بالبروتونات ، فتحلل هذه النظائر من أجل أن ينقص عدد البروتونات ويزداد عدد النيوترونات ، فإما أن تحلل بإطلاق بوزيترون (إلكترون ذو شحنة موجبة)  $e^+$  كما في تحلل النظير  $^{11}\text{C}$  :



أو بالقاط أحد إلكترونات النواة الموجودة في مستوى K أو L وتسمى هذه العملية اقتصاص الإلكترون (Electron Capture) EC كما في المثال التالي :



فيتحول بروتون إلى نيوترون :

هناك تنافس بين إطلاق البوزيترون واقتصاص الإلكترون ، وتزداد احتمالية اقتصاص الإلكترون كلما ازداد العدد الذري .

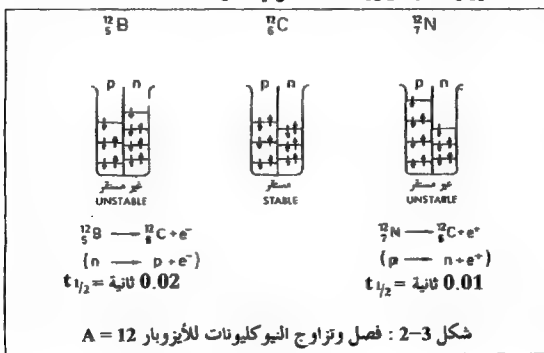
ففي بداية الجدول الدوري تحلل النوى بإطلاق البوزيترون إلى أن نصل إلى منطقة البلاين حيث تزداد احتمالية التحلل باقتصاص الإلكترون وتصبح المسيطرة بعد ذلك . أما في وسط الجدول الدوري فترى النظائر تحلل بالطريقتين .

والبدل لهاتين الطريقتين هو إطلاق البروتون الذي لوحظ بنواة في حوالي 40 نواة بعيدة عن حزمة الاستقرار . وفرة نصف العمر لهذه النوى  $\geq 30$  ثانية . ومن الأمثلة على ذلك (18 ث =  $t_{1/2}$ )  $^{115}\text{Xe}$  (النسبة بين إطلاق البروتون /  $\text{E.C} = 3 \times 10^{-3}$ ) .

إن الزيادة في النسبة  $\frac{N}{Z}$  مع الازدياد في العدد الذري في حزمة الاستقرار عائد لوجود قوى التنافر الإلكترونية (قوى كولومب) بين البروتونات جميعها في النواة . فوجود قوى مستقرة يعني أن هناك قوى تجاذب تربط البروتونات والنيوترونات مع بعضها البعض بحيث تفوق وتتغلب على قوى التنافر المدمرة للنواة

والعكس صحيح . فكلما ازداد عدد البروتونات ازدادت قوى التنافر الكلية ومن أجل أن تكون هناك قوى تجاذب كافية للاستقرار وجب زيادة عدد النيوترونات بسرعة أكبر من الزيادة في عدد البروتونات .

افترض العلماء أن النيوترونات والبروتونات موجودة في أفلاك نيكلونية منفصلة تماماً كالإلكترونات في الذرة ، فإذا كان عدد النيوترونات أعلى بكثير من عدد البروتونات فإن أفلاك النيوترونات الممتلئة ستمتد إلى مستوى طاقة أعلى من تلك التي وصلت إليها أفلاك البروتونات الممتلئة . وهذا سيؤدي إلى زيادة في استقرار النواة عندما يتحول نيوترون في أعلى فلك نيوتروني إلى بروتون في فلك بروتوني طاقته أقل (شكل 3-2) . وسندرس موضوع القوى النووية ومستويات الطاقة للبروتونات والنيوترونات بالتفصيل في فصول لاحقة .



## 2-7 الفرق الكتلي Mass Defect

إذا استخدمنا كتلة نظير الكربون - 12 كأساس لقياس كل ذرات العناصر والدقائق ، فإننا نجد أن كتلة ذرة الهيدروجين وكتلة النيوترون لا تساوي وحدة كتلة ذرية (و.ك.ذ.  $= \frac{1}{12}$  كتلة ذرة  $^{12}\text{C}$ ). إن كتلة ذرة لها عدد كتلي A تساوي  $M_A$  وهذه تساوي عدد البروتونات (Z) مضروباً بكتلة ذرة الهيدروجين ( $M_H$ ) زائد عدد النيوترونات (N) مضروباً بكتلة النيوترون ( $M_n$ ) ، أي أن :

$$M_A \approx Z M_H + N M_n \quad (2-2)$$

وعلى هذا الأساس يمكننا أن نحسب كتلة الهيليوم  $^4_2\text{He}$  على النحو التالي :

$$= 2M_H + 2M_n$$

$$= 2(1.007825) + 2(1.008665) = 4.0329801 \text{ و.ك.ذ.}$$

أما كتلة الهيليوم  $^4_2\text{He}$  المقاسة فإنها 4.0026033 و.ك.ذ. أي أن الفرق الكتلي

$$\Delta M_A = ZM_H + NM_n - M_A \quad (2-3)$$

$$\Delta M_A = 4.0329801 - 4.0026033 = 0.0303768 \text{ و.ك.ذ.}$$

هو عندما تتكون ذرة  $^4_2\text{He}$  ، فإن ما يكافئ 0.0303768 و.ك.ذ. ينطلق على صورة طاقة يمكن أن نحسب قيمتها على أساس مول واحد من ذرات  $^4_2\text{He}$  من معادلة أينشتاين المشهورة :

$$E = mc^2 \quad (2-4)$$

حيث C = سرعة الضوء م/ث و m = الكتلة كغم .

$$E = \text{كغم} \cdot 2.9979 \times 10^8 \left( \frac{\text{م}}{\text{ث}} \right)^2 \cdot 0.030378 \times 10^{-3}$$

$$= \frac{\text{كغم} \cdot \text{م}^2}{\text{ث}^2} \cdot 2.7302 \times 10^{12}$$

وبما أن الجول = 1 كغم.م<sup>2</sup>/ث<sup>2</sup> ، فإن :  $2.7302 \times 10^{12}$  جول/مول

$$= 2.7302 \times 10^9 \text{ كيلوجول/مول}$$

ولأغراض المقارنة ، فإن طاقة احتراق مول من  $\text{CH}_4$  تساوي  $8.9 \times 10^7$  كيلوجول/مول ، أي أن الطاقة المنطلقة من 1 مول من ذرات  ${}^4_2\text{He}$  أكبر بكثير من طاقة الاحتراق .

ومن علاقة أينشتاين نجد أن كل و.ك.ذ = 931.5023 مليون إلكترون

قوالت (MeV) كما يلي : الطاقة المكافئة لوحدة كتلة ذرية هي :

$$E = \left( \frac{m}{\text{ث}} 2.9979246 \times 10^{10} \right)^2 \times 1.660566 \times 10^{-24} \text{ غم} \\ = 1.492442 \times 10^{-3} \text{ إرغ}$$

و نستخدم هنا وحدة طاقة تسمى بالإلكترون قوالت .

واحد إلكترون قوالت (1eV) =  $1.602189 \times 10^{-12}$  إرغ

و 1eV/جزء = 23.045 كيلوكالوري/مول = 96.48 ك.ج/مول .

أي أن الطاقة المكافئة لوحدة كتلة ذرية بوحدة الإلكترون قوالت هي :

$$E = 931.502 \times 10^6 \text{ إلكترون قوالت}$$

$$E = \text{MeV } 931.502$$

أو

أي أن الفرق الكتلي لـ  ${}^4_2\text{He}$  =

$$\text{MeV } 28.2960 = 931.502 \times \text{و.ك.ذ. } 0.0303768$$

والفرق الكتلي للديوتيريوم هو  $\text{MeV } 2.224$  ، وقد لاحظ العلماء انطلاق

هذه الطاقة عند إمساك البروتون لنيوترون قليل الطاقة . ومن التعريف السابق

للفرق الكتلي  $\Delta M_A$  نجد أن لجميع النظائر المستقرة قيم موجبة (انظر الملحق أ) .

ويستخدم بعض العلماء الزيادة في الكتلة  $\text{Mass Excess}$  والتي يرمز لها  $\Delta$

وتُعرف على أنها الفرق بين الكتلة الذرية المقاسة والعدد الكتلي .

$$\Delta_A = M_A - A$$

(2-5)

وتمثل قيم  $\Delta$  بوحدة و.ك.ذ أو eV ، يبين الجدول (2-2) قيم الكتل الذرية والفروق الكتلية والزيادة في الكتلة لبعض النظائر .

الرمز Element	Z	N	A	الكتلة الذرية Atomic mass $M_A$ (u)	الزيادة في الكتلة $\Delta$ Mass excess $M_A - A$ (u)	فرق الكتلة Mass defect $\Delta M_A$ (u)	طاقة الربط Binding energy $E_B$ (MeV)	طاقة الربط / نيوكلون $E_B/A$ (MeV / nucleon)
n	0	1	1	1.008 665	8 665	0	-	-
H	1	0	1	1.007 825	7 825	0	-	-
D	1	1	2	2.014 102	14 102	2 388	2.22	(2.22)
T	1	2	3	3.016 049	16 049	9 106	8.48	2.83
He	2	1	3	3.016 030	16 030	8 285	7.72	2.57
He	2	2	4	4.002 604	2 604	30 376	28.29	7.07
He	2	4	6	6.018 893	18 893	31 417	29.26	4.87
Li	3	3	6	6.015 126	15 126	34 344	31.99	5.33
Li	3	4	7	7.016 005	16 005	42 130	39.24	5.60
Be	4	3	7	7.016 929	16 929	40 366	37.60	5.37
Be	4	5	9	9.012 186	12 186	62 439	58.16	6.46
Be	4	6	10	10.013 535	13 535	69 755	64.97	6.49
B	5	5	10	10.012 939	12 939	69 511	64.74	6.47
B	5	6	11	11.009 305	9 305	81 810	76.20	6.92
C	6	6	12	12.000 000	0 000	98 940	92.15	7.67
N	7	7	14	14.003 074	3 074	112 356	104.6	7.47
O	8	8	16	15.994 915	-3 085	137 005	127.6	7.97
F	9	10	19	18.998 405	-1 595	158 670	147.8	7.77
Ne	10	10	20	19.992 440	-7 560	172 460	160.6	8.03
Na	11	12	23	22.989 771	-10 229	200 284	186.5	8.11
Mg	12	12	24	23.985 042	-14 958	212 838	198.2	8.25
Al	13	14	27	26.981 539	-18 461	241 496	224.9	8.33
Si	14	14	28	27.976 929	-23 071	253 931	236.5	8.44
P	15	16	31	30.973 765	-26 235	282 250	262.9	8.48
K	19	20	39	38.963 710	-36 290	358 265	333.7	8.56
Co	27	32	59	58.933 189	-66 811	555 366	517.3	8.77
Zr	40	54	94	93.906 133	-93 867	874 777	814.8	8.67
Ce	58	82	140	139.905 392	-94 608	1 258 988	1172.7	8.38
Ta	73	108	181	180.948 007	-51 993	1 559 038	1452.2	8.03
Hg	80	119	199	198.968 279	-31 721	1 688 856	1573.0	7.90
Th	90	142	232	232.038 124	38 124	1 896 556	1766.6	7.62
U	92	144	236	236.045 637	45 637	1 922 202	1791.0	7.59
U	92	146	238	238.050 770	50 770	1 934 220	1801.7	7.57
Pu	94	146	240	240.053 882	53 882	1 946 758	1813.4	7.56

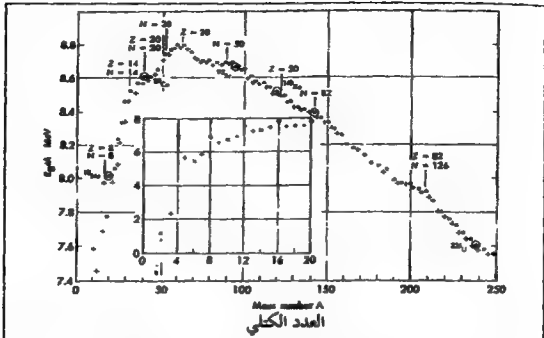
جدول 2-2 : الكتل الذرية وطاقات الربط .

## 2-8 طاقة الربط النووي Nuclear Binding energy

عند حرق الهيدروجين في الأوكسجين في الحالة الغازية تحت ضغط جوي ، فإن التفاعل يسير بشكل تلقائي بمجرد أن تبدأ التفاعل ويؤدي إلى تكون الماء وإنتاج كمية كبيرة من الطاقة الحرارية ، فالتفاعل طارد للحرارة . وأثناء التفاعل تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حرارية ، فتقل طاقة الوضع نتيجة لذلك ، وتصل الحالة إلى الاستقرار ، كما أن الطاقة المنطلقة عند تكون نواة ما من عدد من ذرات الهيدروجين وعدد من النيوترونات مقياس لاستقرار النواة ، وتسمى هذه الطاقة بطاقة الربط ، والتي تعرف أيضاً على أنها الطاقة اللازمة لفكك النواة إلى مكوناتها الأساسية (ذرات هيدروجين ونيوترونات) . فطاقة الربط للهيليوم  $28.296 \text{ MeV}$  وللديوتيريوم  $2.224 \text{ MeV}$  ، أي أن طاقة الربط  $E_B$  تساوي قيمة الفرق الكتلي بوحدة وحدة الكتلة الذرية مضروباً بمعامل التحويل  $931.5 \frac{\text{MeV}}{\text{و.ه.ذ.}}$  .

$$E_B = 931.5 \times \Delta M_A \quad (2-6)$$

كما استدل العلماء على استقرار النواة من قيمة طاقة الربط لكل نيوكليون والتي تساوي طاقة الربط بوحدة المليون إلكترون فولت مقسومة على العدد الكتلي لتلك النواة ويرمز لها  $E_{B/A}$  بقيمة  $E_{B/A}$  للهيليوم تساوي  $7.1 = \frac{28.3}{4} \text{ MeV}$  بينما للديوتيريوم  $1.11 = \frac{2.22}{2} \text{ MeV}$  . لهذا فإن نواة  ${}^4_2\text{He}$  أكثر استقراراً من نواة الديوتيريوم . تقع قيم  $E_{B/A}$  لمعظم النوى بين 5 و 9 مليون إلكترون فولت (شكل 4-2) . أي أن  $E_{B/A}$  تقريباً ثابتة وهذا يعني أن طاقة الربط النووي تتناسب طردياً مع عدد النيوكليونات (A) في النواة .



شكل 4-2 : علاقة طاقة الربط لكل نيوكليون  $E_{B/A}$  مع العدد الكتلي  $A$  ترمز • إلى زوجي-زوجي و + إلى فردي-زوجي وزوجي-فردي و x إلى فردي-فردي أيزوبار

نلاحظ من الشكل (4-2) أن  $E_{B/A}$  تزداد مع ازدياد العدد الكتلي حتى تصل أعلى قيمة لها عند  $A=60$  ومن ثم تتناقص مع ازدياد العدد الكتلي . فالنوى التي تقع في منطقة  $A=60$  كالنيكل والحديد أكثرها استقراراً . ويبين الشكل السابق أعداد النيوترونات والبروتونات التي تكون تراكيب نووية مستقرة على شكل نويات صغيرة في المنحنى .

إذا اندمجت نواتان لتكوين نواة جديدة لها  $E_{B/A}$  أعلى من  $E_{B/A}$  للنواتين المندمجتين انطلقت كمية من الطاقة . وتسمى هذه العملية بالاندماج النووي Fusion ، وهي مطلقة للطاقة وتحدث عندما يكون للنوى عدد كتلي أقل من 60 ، فعلى سبيل المثال



فقيمة  $E_{B/A}$  لـ  $^{20}_{10}\text{Ne}$  من الشكل (2-4) حوالي 8.0 MeV ولـ  $^{40}_{20}\text{Ca}$  حوالي 8.6 MeV . أي أن طاقة الربط لنواتي  $^{20}_{10}\text{Ne}$  تساوي 320 MeV .

$$2 \times 20 \times 8.0 = \text{MeV } 320$$

وهذه طاقة داخلية في الاندماج ، أما طاقة الربط الناتجة عن الاندماج فتساوي  $344 = \text{MeV } 40 \times 8.6$  في نواة  $^{40}_{20}\text{Ca}$  .

فالفرق بين المفاعلات والنوابع يساوي 24 MeV = 344 - 320 ، وهذا الفرق يظهر على هيئة طاقة منطلقة .

كما يظهر الشكل (2-4) أن هناك انطلاقاً في طاقة الربط عند انشطار نواة عنصر لها ( $A > 60$ ) عدد كلي أعلى من 60 إلى نواتين خفيفتين ولكن لهما  $E_{B/A}$  أعلى من النواة المنشطرة . ومثال على ذلك انشطار  $^{236}_{92}\text{U}$  . حيث ينشطر حسب المعادلة التالية :



فقيمة  $E_{B/A}$  لـ  $^{236}_{92}\text{U}$  تساوي 7.6 MeV ولـ  $^{140}_{54}\text{Xe}$  8.4 MeV ولـ  $^{93}_{38}\text{Sr}$  8.7 MeV . أما كمية الطاقة المنطلقة من الانشطار فتساوي

$$\text{MeV } 191.5 = 236 \times 7.6 - 140 \times 8.4 + 93 \times 8.7$$
 لكل ذرة  $^{236}_{92}\text{U}$  منشطرة .

## 2-9 نصف قطر النواة Nuclear radius

أوضح العالم رذرفورد أن النواة تحتل جزءاً صغيراً من الحجم الكلي للذرة ويقدر نصف قطر النواة بحوالي  $\frac{1}{10000}$  إلى  $\frac{1}{100000}$  من نصف قطر الذرة . ويستخدم الانجسروم  $^{\circ}\text{A}$  (م  $10^{-10} = 1\text{A}^{\circ}$ ) أو البيكرومتر Pm (م  $10^{-12}$  = 1Pm) في قياس نصف قطر الذرة بينما تستخدم وحدة الفيرمي fm (م  $10^{-15}$  = 1fm) في قياس نصف قطر النواة .



وجد العلماء بالتجربة أن حجم النواة  $V_n$  يتناسب طردياً مع العدد الكلي لنوكليونز أي مع العدد الكلي  $A$  .

$$V_n \propto A \quad (2-7)$$

وبما أن حجم الكرة يتناسب طردياً مع مكعب نصف قطر الكرة  $r$  ،

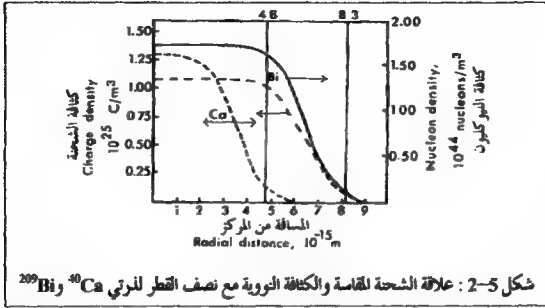
$$V \propto r^3 \quad (2-8)$$

يمكننا الربط بين  $A$  و  $r$  حيث أن  $A \propto r^3$  أو  $r \propto A^{1/3}$  .

وباستخدام  $r_0$  كمعامل تناسب فإن :

$$r = r_0 A^{1/3} \quad (2-9)$$

والمفهوم العلمي لهذه العلاقة هو أن النواة مكونة من نوكليونز مرسوسة على بعضها البعض مما يعني أن الكثافة ثابتة في جميع أنحاء النواة (حوالي 0.2 نوكليونز /  $\text{fm}^3$ ) من مركزها إلى حدودها . أثبت التجارب في ما بعد أن نموذج الكثافة الثابتة غير صحيح وذلك من خلال قذف النوى بالكروونات ذات طاقة عالية جداً أو بروتونات ذات طاقة عالية جداً قد تصل إلى 1GeV (غيغا إلكترون فولت) ، ومن قياس زاوية التشتت والطاقة للدقائق يمكننا حساب ودراسة التغير في كثافة الكتلة وكثافة الشحنة عند سطح النواة المقذوفة . وقد أثبتت هذه التجارب أن ليس هناك توزيع منتظم للكتلة وللشحنة عند أطراف أو حدود النواة مما يعني أن سطح النواة غير واضح أو غير محدد . كما لوحظ أن هناك تناقص في كثافة الشحنة كلما ابتعدنا عن مركز النواة ويبين شكل (2-5) هذا السلوك لنواتي  $^{209}\text{Bi}$  و  $^{40}\text{Ca}$  ونستنتج من الشكل (2-5) أن هناك ثباتاً في كثافة الشحنة والكتلة لمسافة قصيرة من مركز النواة ومن ثم يبدأ التناقص في الكثافتين لمسافة 2.5fm تقريباً ولا يعتمد هذا السمك على العدد الذري .



ففي نواة  $^{209}\text{Bi}$  مثلاً تبقى الكثافة ثابتة تقريباً لحوالي 5 fm من مركز النواة ثم تبدأ بالتناقص التدريجي إلى 0.1 القيمة في 2 fm القادمة . ولقد وجد العلماء أن شكل بعض الأنوية غير كروي فبعضها له شكل مفلطح Oblate والبعض الآخر متظاول Prolate حول محور الدوران .

على ضوء ما جاء فإن فرضية الكثافة الثابتة والحدود الثابتة المحددة صالحة لمعظم الغايات والاستخدامات .

فإذا استخدمنا المعادلة (9-2) وافترضنا أن قيمة  $r_0 = 1.4 \text{ fm}$  فإن نصف قطر نواة  $^{40}\text{Ca} = 4.79 \text{ fm} = 1.4 \text{ fm} \times 40^{1/3}$  .

ونصف قطر نواة  $^{209}\text{Bi} = 8.31 \text{ fm} = 1.4 \text{ fm} \times 209^{1/3}$  .

وهاتان القيمتان موضحتان في الشكل السابق (5-2) .

وبنفس الطريقة يمكننا أن نحسب نصف قطر  $^{80}\text{Br}$  الذي يساوي 6.0 fm ونصف قطر  $^{238}\text{U}$  الذي يساوي 8.7 fm . وإذا أعينا النظر بالقيم الأربع لنصف القطر وجدنا أنه لا يتغير كثيراً من بداية الجدول الدوري إلى نهايته أي من العناصر الخفيفة إلى الثقيلة .

## 2-10 معادلة طاقة الربط الشبه تجريبية

### Semiempirical Binding Energy Equation

تعلمنا في ما سبق أن حجم وطاقة ربط النواة يتناسبان طردياً مع عدد النيوكليونات في النواة . ومن علاقة الحجم نستنتج أن المادة النووية المكونة للنواة غير قابلة للانضغاط . كما نستنتج من علاقة طاقة الربط أن قوى الربط النووية تتمتع بخاصية الإشباع ، أي أن النيوكليون يرتبط فقط مع عدد صغير من النيوكليونات الأخرى وهذا يشبه ارتباط جزيء الماء في السائل مع أربع جزيئات ماء أخرى . وهناك تشابه في الخواص بين النواة وقطرة السائل وهذا التشابه دفع العلماء إلى تفسير طاقة الربط النووية على أساس نموذج جديد تكون فيه النواة وكأنها قطرة سائل مشحونة ولها توتر سطحي . وعلى هذا فإنه يمكن كتابة معادلة لطاقة ربط الكتلة الكلية في القطرة مكونة من عدة حدود (أو مقادير) منها طاقة الحجم وطاقة السطح وطاقة التناثر وغيرها ، وتعتمد هذه العوامل على العدد الكتلي  $A$  والعدد الذري  $Z$  للنواة .

ففي عام 1935 وضع العالم س.ف. فون فيزكر أول معادلة شبه تجريبية تشتمل على عدة مقادير ومعاملاتها (2-10) .

$$E_B(\text{MeV}) = a_v A - a_s \frac{(N-Z)}{A} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_8 A^{2/3} \pm a_6 A^{-1} \quad (2-10)$$

حيث أن  $a_6, a_8, a_c, a_s, a_v$  ثوابت .

بعد ذلك مرت هذه المعادلة بعدة مراجعات وتحسينات من قبل العلماء وذلك من خلال إضافة مقادير جديدة أو تغيير معاملاتها وأحدث معادلة هي معادلة مايرز وسويتسكي (2-11) .

$$E_B(\text{MeV}) = C_1 A \left[ 1 - K \left( \frac{N-Z}{A} \right)^2 \right] - C_2 A^{2/3} \left[ 1 - K \left( \frac{N-Z}{A} \right)^2 \right] - C_3 Z^2 A^{-1/3} + C_4 Z^2 A^{-1} + \delta \quad (2-11)$$

حيث أن قيمة  $C_1 = 15.667 \text{ MeV}$  و  $C_2 = 18.56 \text{ MeV}$

و  $C_3 = 0.717 \text{ MeV}$  و  $C_4 = 1.211 \text{ MeV}$  و  $K = 1.79$ .

تحتوي المعادلة (2-11) على ستة مقادير ، كما أن القيم المحسوبة بها لطاقة الربط لحوالي 1200 نواة تتفق مع القيم المقاسة ضمن  $10 \text{ MeV}$  وسندرس المقادير المختلفة بالتفصيل .

### 2-10-1 طاقة الحجم Volume Energy

ينظر لهذا المقدار على أنه الأهم والمسيطر وطاقة الحجم تتناسب طردياً مع العدد الكتلي وهذا يعكس خاصية الإشعاع وقصر المدى للقوى النووية ، ويصل الإشعاع إلى أعلى قيمة له عندما يكون عدد النيوكليونات أربعة (بروتونين ونيوترونين) فتجاذب مع بعضها البعض ويستبدل على هذا من قيم طاقة الربط العالية لـ  ${}^4_2\text{He}$  و  ${}^{12}_6\text{C}$  و  ${}^{16}_8\text{O}$  ... إلخ ، شكل (2-4) .

أما حد التصحيح فيتناسب مع  $\frac{(N-Z)^2}{A}$  طردياً ويسمى بطاقة التماثل Symmetry energy . ويعكس هذا الحد الحقيقة القائلة بأن القوى النووية (بغض النظر عن قوى التافى) تكون أعلى ما يمكن عندما يكون عدد البروتونات يساوي عدد النيوترونات وتقل كلما زاد الفرق بينهما وهذا يظهر في  $(N-Z)^2$  . أما الاعتماد على  $A^{-1}$  فيأتي من احتمالية وجود زوج (بروتون مع نيوترون) ضمن حجم معين وهذه الاحتمالية تتناسب عكسياً مع حجم النواة ، علماً بأن طاقة

الربط الناتجة عن هذا الزوج تتناسب مع احتمالية وجوده .  
 إن الاستقرار الزائد في النوى التي يتساوى فيها  $N$  و  $Z$  ( $N=Z$ ) يأتي جزئياً  
 من خلال مبدأ باولي للاستثناء والذي يقول بعدم إمكانية وجود نيوكليونين  
 متماثلين في نفس المستوى من الطاقة .

## 2-10-2 طاقة السطح Surface Energy

إن النيوكليونات الموجودة في وسط النوى تتمتع بخاصية الإشباع فهي محاطة  
 بعدد ثابت من النيوكليونات أما النيوكليونات الموجودة على السطح فهي غير مشبعة  
 وهذا ينقص من طاقة الربط ويتناسب هذا النقص مع سطح النواة . وبما أن  
 $r \propto A^{1/3}$  وأن مساحة سطح النواة تتناسب مع  $r^2$  ، فإن مساحة السطح تتناسب  
 مع  $A^{2/3}$  . ويلاحظ أنه كلما ازداد حجم النواة كلما نقصت نسبة مساحة السطح  
 إلى الحجم ، مما ينقص من أهمية هذا المقدار . لا يظهر حد التصحيح لطاقة السطح  
 في معظم معادلات طاقة الربط المعروفة سابقاً إلا أن مايرز وسويتكي أدخلوا هذا  
 الحد ، وفسروا ذلك على أساس أن في النوى ذات القيمة  $|N-Z|$  العالية تقرب  
 طاقة الحجم من الصفر وهذا سيؤدي إلى اختفاء التوتر السطحي أو طاقة السطح .

## 2-10-3 طاقة التآفر الكولومبي Coulomb Energy

يمثل المقدار  $C_3 Z^2 A^{-1/3}$  طاقة التآفر الإلكروستاتيكي الناتجة عن التآفر  
 الكولومبي بين البروتونات ، وطاقة التآفر تنقص طاقة الربط . إذا افترضنا وجود  
 كرة منتظمة الشحنة ذات نصف قطر  $R$  وشحنة  $q$  ، فإن الطاقة الإلكروستاتيكية  
 تساوي  $3/5 q^2/R$  وبما أن  $Ze = q$  و  $R = r_0 A^{1/3}$  فإن الطاقة الإلكروستاتيكية

تساوي  $\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r_0 A^{1/3}}$  أو  $\left( \frac{3e^2}{5r_0} \right) Z^2 A^{-1/3}$  وبالتعويض بقيمة  $r_0 = 1.205 \text{ fm}$  فإن  $C_3 = 0.717 \text{ MeV} = \frac{3e^2}{5r_0}$ .

تردد طاقة التناثر الكولومي كلما ازداد عدد البروتونات  $Z$  وهذا يفسر ازدياد عدد النيوترونات عن عدد البروتونات في النوى المستقرة التي لها  $Z > 20$  (شكل 2-2).

عندما درسنا موضوع نصف قطر النواة تبين لنا أن توزيع الشحنة في النواة غير منتظم ومبثر عند الحدود. وأدت هذه البثرة إلى وجود حد تصحيح يقلل من تأثير طاقة التناثر الكولومي وهذا الحد هو المقدار الرابع في المعادلة (2-11).

#### 2-10-4 طاقة الازدواج Pairing Energy

يعتمد المقدار الأخير في المعادلة (2-11) على الحقيقة القائلة بأن هناك علاقة بين طاقة الربط والطبيعة الزوجية أو الفردية لعدد البروتونات وعدد النيوترونات. وقد درسنا هذه العلاقة في السابق (5-2). فالنوى ذات الأعداد زوجي - زوجي (e-e) أكثرها استقراراً ولهذا فإن قيمة  $\delta = 11/A^{1/2}$  وأما في حالة زوجي - فردي (eZ-oN) أو فردي - زوجي (oZ-eN) فإن قيمة  $\delta = 0$  صفرأ. وأخيراً في النوى ذات الأعداد فردي - فردي (o-o) فإن قيمة  $\delta = -11/A^{1/2}$ . ويسمى المقدار  $\delta$  في معادلة طاقة الربط بمقدار الازدواج.

إن الاستقرار الزائد والناجم عن وجود مستويات طاقة معينة تماماً يتجلى بوضوح في عدد النوى المستقرة الكبير في فئة زوجي - زوجي وفي نسبة وجودها العالية في الطبيعة. فنجد في الغالب أن نسبة وجود العناصر ذات العدد الزوجي

من البروتونات أعلى من تلك ذات العدد الفردي بحوالي عشر مرات . ففي العناصر ذات العدد الزوجي من البروتونات تشكل النظائر ذات العدد الزوجي من النيوترونات حوالي 100-70٪ من ذلك العنصر ما عدا في حالة البريليوم والزنون والدمريوزيوم .

ويفسر العلماء ما جاء في الشكل (4-2) الذي تصل فيه  $E_B/A$  إلى أعلى قيمة لها عند  $A = 60$  على أنها نتيجة لالتجاهين متعاكسين أولهما طاقة السطح التي تقل مع الزيادة في العدد الكتلي وثانيهما طاقتي التنافر الكولومبي والتماثل اللتان تزدادا مع الزيادة في العدد الكتلي .

## 2-11 طاقة السطح النووية والقطع المكافئ الكتلي

### Nuclear Energy Surface and Mass Parabola

يمكن التعبير عن طاقة الربط لكل الأنوية على أنها دالة لـ  $A$  ولـ  $Z$  من خلال رسم ثلاثي الأبعاد للمعادلة (2-11) . ومقدورنا الحصول على بعض الصفات المفيدة لهذا الرسم قبل أن نرسمه ، ولهذا علينا التعامل مع كتلة الذرة الكلية  $M$  بدل من طاقة الربط  $E_B$  ، وتكتب معادلة طاقة الربط النووي بدلالة  $M$  على النحو التالي :

$$M = Z M_H + (A-Z) M_N - E_B \quad (2-12)$$

حيث أن  $M_H$  كتلة ذرة الهيدروجين (938.791 MeV) و  $M_N$  كتلة النيوترون (939.573 MeV) . وبالجمع بين المعادلتين (2-11) و (2-12) نحصل على معادلة الكتلة الشبه تجريبية (2-13) .

$$M = 939.573 A - 0.782 Z - (C_1 A - C_2 A^{2/3}) \left[ 1 - K \left( 1 - 2 \frac{Z}{A} \right)^4 \right] + Z^2 (C_3 A^{-1/3} - C_4 A^{-1}) - \delta \quad (2-13)$$

وبالنظر إلى المعادلة (2-13) نرى أنها معادلة تربيعية لـ  $Z$  ، وأنه يمكن كتابتها بالشكل الآتي :

$$M = f_1(A) Z^2 + f_2(A) Z + f_3(A) - \delta \quad (2-14)$$

علماً بأن المعاملات الثلاث دالة لـ  $A$  ومعادلاتها كالآتي :

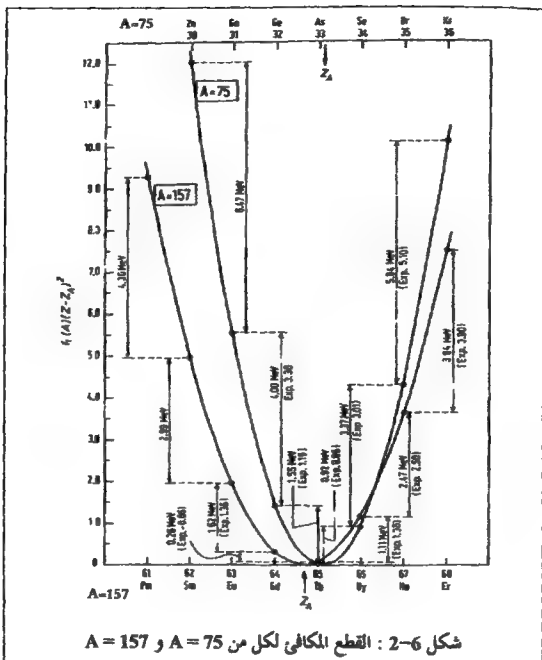
$$f_1(A) = 0.717 A^{-1/3} + 111.036 A^{-1} - 132.89 A^{-4/3}$$

$$f_2(A) = 132.89 A^{-1/3} - 113.029$$

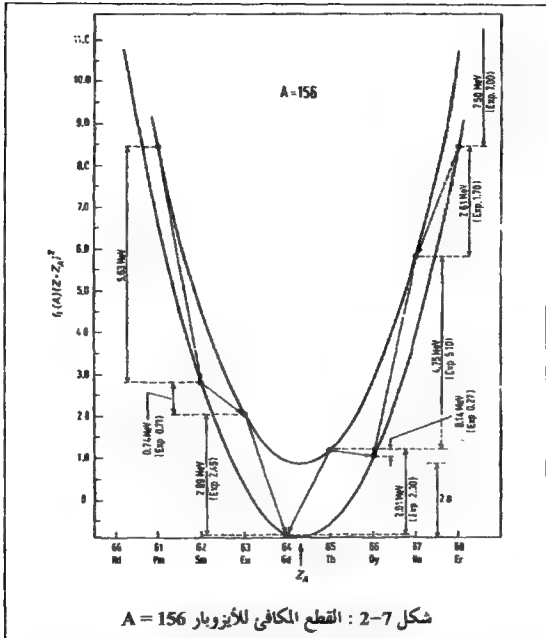
$$f_3(A) = 951.958 A - 14.66 A^{2/3}$$

وأن قيمها ثابتة لكل قيمة من  $A$  ، مما يعني أن المعادلة (2-14) هي معادلة قطع مكافئ إذا كانت  $A$  فردية (صفر  $\delta = 0$ ) وتعطي قطعين مكافئين إذا كانت  $A$  زوجية ( $\delta = \pm 11 A^{-1/2}$ ) . ونستفيد من هذه القطوع في دراسة التحلل بدقائق بيتا، حيث يمكننا معرفة طاقة التحلل بدقائق بيتا بين الأيزوبارز المجاورة مباشرة منها . ولتوضيح هذا ، سندرس القطع المكافئ لكل من  $A = 157$  و  $A = 75$  (شكل 6-2) والقطعين المكافئين لـ  $A = 156$  (شكل 2-7) .





شكل 6-2 : القطع المكافئ لكل من  $A = 157$  و  $A = 75$



ويمكننا الحصول من رأس القطع المكافئ الكتلي على الكتلة الدنيا أو طاقة الربط العليا لكل قيمة من  $A$ . ومن أجل أن نجد  $Z_A$  الخاصة بالكتلة الدنيا علينا أن نفاضل المعادلة (2-14) بالنسبة لـ  $Z$  علماً بأن  $A$  ثابتة ومن ثم نساوي المشتقة بالصفر فنحصل على معادلة  $Z_A$  التالية (2-15).

$$Z_A = \frac{-f_2(A)}{2f_1(A)} \quad (2-15)$$

وبما أن  $Z$  دالة مستمرة فإن قيم  $Z_A$  عددية غير صحيحة .

فقيمة  $Z_A = 64.69$  لـ  $A = 157$  و  $Z_A = 64.32$  لـ  $A = 156$  و  $Z_A = 33.13$  لـ  $A = 75$  .

ومن أجل أن نرسم القطع المكافئ الطاقى نستخدم المعادلة (2-15) في إعادة كتابة المعادلة (2-14) لنحصل على المعادلة الجديدة (2-16) التالية :

$$M = f_1(A) (Z - Z_A)^2 - \delta + f(A) \quad (2-16)$$

حيث أن  $f(A) = f_3(A) - f_2(A)^2 / 4 f_1(A)$

وبما أن  $f(A)$  دالة لـ  $A$  فلا نحتاج لإيجاد قيمتها وذلك لأن الفرق في الطاقة هو ما نبحث عنه بين الأيزوبارز . وبالنظر إلى الشكلين (2-6) و (2-7) نجد أن محور (ص) يمثل  $f_1(A) (Z - Z_A)^2$  . تكون الكتلة ذات  $Z = Z_A$  في الأيزوبارز ذات  $A$  الفردية موازية للصفر على محور ص وذلك لأن  $Z - Z_A$  تساوي صفر وأما عندما تكون  $A$  زوجية فيقع الصفر في منتصف المسافة بين رأسي القطعين المكافئين زوجي-زوجي وفردى-فردى . ونحدد  $f_1(A)$  عرض القطع المكافئ حيث تقل قيمتها كلما زادت  $A$  ولهذا يعرض وادي الاستقرار في سطح الطاقة النووي كلما ازدادت  $A$  (شكل 2-6) .

وإذا قمنا بدراسة القطوع المكافئة لمجموعة من الأيزوبارز وجدنا عدة استنتاجات مهمة تتعلق بالاستقرار النووي . فعلى سبيل المثال هناك فقط نواة واحدة مستقرة نحو بيتا ( $\beta$ ) في الأيزوبارز ذات  $A$  الفردية تكون قريبة جداً لأدنى قيمة في القطع المكافئ ، ويكون هناك نواتان مستقرتان أو ثلاث أنوية (نوى) مستقرة في الأيزوبارز ذات  $A$  الزوجية وجميعها من النوع زوجي-زوجي . ويمكننا

القول أن هناك نواتان مستقرتان  $^{156}\text{Gd}$  و  $^{156}\text{Dy}$  في الشكل (2-7) وذلك لأن لكل منهما كتلة أقل من جارهم  $^{156}\text{Tb}$  . ومن وجهة الديناميكا الحرارية فإن  $^{156}\text{Dy}$  غير مستقر نحو التحلل إلى  $^{156}\text{Gd}$  الذي يتقصه في الكتلة ، ومن أجل أن يحدث هذا عليه أن يطلق دقيقتي  $\beta$  في نفس الوقت (في هذه الحالة اقتصاص الإلكترون) وتسمى هذه العملية بتحلل  $\beta$  المزدوج double  $\beta$ -decay . ومن المتوقع أن يكون لهذه العملية نصف عمر عال جداً ناتج عن الاحتمالية القليلة جداً لحوثها . ومن الأمثلة المعروفة  $^{130}\text{Te}$  إلى  $^{130}\text{Xe}$  بنصف عمر سنة  $t_{1/2} = 2 \times 10^{21}$  و  $^{82}\text{Se}$  إلى  $^{82}\text{Kr}$  بنصف عمر سنة  $t_{1/2} = 1 \times 10^{20}$  .

ويوضح الشكلان (2-6) و (2-7) التساوب بين القيم الصغيرة والكبيرة لطاقة التحلل بيتا في الأيزوبارز ذات A الزوجية بينما تزداد الطاقة لبيتا في اتجاه  $Z_A$  من كلا الطرفين في الأيزوبارز ذات A الفردية . ونرى في الشكل (2-7) إمكانية النواة الفردي-الفردي مثل  $^{156}\text{Tb}$  على التحلل إلى جارتها الزوجي-الزوجي بواسطة التحلل بـ  $\beta^-$  أو  $\beta^+$  واقتصاص الإلكترون E.C ، ولحد الآن لم يتم الكشف مخبرياً على تحلل  $^{156}\text{Tb}$  بـ  $\beta^-$  وذلك لأن طاقة التحلل قليلة جداً ، وتسمى هذه الظاهرة بالتحلل المتفرع Branching Decay .

ونلاحظ أيضاً في الشكلين (2-6) و (2-7) وجود قيم مقاسة لطاقة التحلل بيتا ، وإذا قررنا هذه القيم مع تلك المحسوبة من معادلة طاقة الربط تبين لنا أن هناك توافقاً كبيراً يقع ضمن عدة مئات من KeV . وللحصول على توافق تام فلا بد من إدخال تعديل على  $f_1(A)$  و  $Z_A$  لتطابق مع نقاط معروفة في منطقة A و Z . ومن الأمثلة على ذلك أن  $^{157}\text{Tb}$  هو الأيزوبار المستقر ضمن  $A = 157$  ولهذا نتوقع أن  $^{157}\text{Gd}$  سيتحلل بواسطة  $\beta^-$  لـ  $^{157}\text{Tb}$  بطاقة تساوي 0.26 MeV . ومن

الغريب أن  $^{157}\text{Gd}$  نظير مستقر وأن  $^{157}\text{Tb}$  يتحلل بواسطة E.C ليعطي  $^{157}\text{Gd}$  وبطاقة مقاسة تساوي  $0.06\text{MeV}$  . ومن أجل أن نحصل على توافق مع هذه الحقيقة العملية علينا أن ننقص  $0.2$  من قيمة  $Z_A$  ، وهذا التعديل سيقيدنا في الحصول على قيم لطاقة  $\beta$  مساوية للقيم المقاسة وفي التقدير الصحيح للقيم التي لم يتم قياسها بعد مثل  $^{157}\text{Sm}$  و  $^{157}\text{Pm}$  .

## الأسئلة :

- 1) احسب طاقة الربط لكل نيوكلون للنظائر التالية :  
 $^{238}\text{U}$ ,  $^{195}\text{Pt}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{100}\text{Pd}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^6\text{Li}$   
 طاقة الربط ومن الكتل الذرية في ملحق أ .
- 2) احسب من الكتل الذرية في ملحق أ ما يلي :  
 أ) طاقة الربط للنيوترون المضاف إلى كل من  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{50}\text{V}$ ,  $^{16}\text{O}$ .  
 ب) طاقة الربط للبروتون المضاف إلى كل من  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{10}\text{B}$ .  
 (الجواب أ)  $^{239}\text{Pu}$  6.53 MeV ، ب)  $^{52}\text{Mn}$  7.53 MeV .  
 3) استخدم معادلة طاقة الربط النووي بدلالة M لإيجاد ما يلي :  
 أ) الطاقة المنطلقة من إضافة نيوترون إلى نواة  $^{235}\text{U}$ .  
 ب) الطاقة المنطلقة من إضافة نيوترون إلى نواة  $^{238}\text{U}$ .  
 جـ) الطاقة المنطلقة لبنتا من تحلل  $^{129}\text{I}$  إلى  $^{129}\text{Xe}$ .  
 قارن أجوبتك بالقيم المحسوبة من قيم الزيادة في الكتلة في ملحق أ .  
 (الجواب أ) 6.7 MeV .
- 4) عين قيم  $Z_A$  لكل من  $A = 27$ ,  $A = 131$ ,  $A = 204$  وذلك باستخدام معادلة الكتلة الشبه تجريبية ، ثم قارنها مع النتائج العملية في ملحق أ .  
 (الجواب  $Z_{27} = 12.68$ ) .
- 5) احسب الطاقة الناتجة من :  
 أ) تحلل كل من  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{192}\text{Pt}$  بواسطة  $\alpha$ .  
 ب) انشطار كل من  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  إلى جزئين متساويين .  
 (الجواب  $^{252}\text{Cf}$  أ) 6.22 MeV ب) 232 MeV .

## الفصل الثالث

### طرق التحلل الإشعاعي النووي

### RADIOACTIVE DECAY PROCESSES

#### 3-1 مقدمة

ينظر للتحلل الإشعاعي النووي على أنه تغير نووي تلقائي لا يتأثر بالضغط ولا بدرجة الحرارة ولا بالصيغة الكيميائية ... إلخ .

ولهذا فقد تمكنا من تشخيص النوى المشعة على أساس فترة التحلل وطريقة التحلل و طاقة التحلل بغض النظر للحالة الكيميائية والفيزيائية . ويعبر عن فترة التحلل من خلال فترة نصف العمر  $t_{1/2}$  وهي المدة الزمنية اللازمة لتحلل نصف عدد ذرات النظير المشع ، ومهما كان عدد الذرات الموجودة منه في البدء (شكل 1-1) . تتراوح فترات نصف العمر من ملايين السنين إلى أجزاء من الثانية . ومن السهل قياس فترات نصف العمر التي تتراوح ما بين دقيقة إلى سنة بالطرق المخبرية البسيطة ، وأما الفترات القصيرة جداً فإنها تحتاج إلى طرق مفصلة ومعقدة وباستخدام الأجهزة المتقدمة . وقد تمكن العلماء من قياس فترة نصف عمر في حدود  $10^{-14}$  ثانية والتحلل الإشعاعي الذي يحدث في أقل من هذه المدة الزمنية هو تحلل فوري . وفي المقابل فإذا كانت فترة نصف العمر أكثر من  $10^{15}$  سنة فإنه لا يمكن ملاحظة هذا التحلل فوق الإشعاع الخلفي الطبيعي ولهذا اعتبرت هذه النوى مستقرة نحو التحلل بالإشعاع . وفترة  $10^{15}$  سنة أكبر من عمر الكون بـ  $10^5$  مرة .

يتضمن التحلل بالإشعاع الانتقال من حالة كمية محددة في النواة الأصلية المتحللة إلى حالة كمية محددة في النواة الناتجة والفرق في الطاقة ما بين المستويين الكميّين المذكورين في التحلل يساوي طاقة التحلل . وتظهر طاقة التحلل على هيئة إشعاعات كهرومغناطيسية أو كطاقة حركية للنواتج .

وتعتمد طريقة التحلل بالإشعاع على تلك النواة المتحللة .

ويقسم التحلل الإشعاعي إلى ثلاثة أنواع :

أ ( التحلل بدقاتق ألفا  $\alpha$  .

ب) التحلل بدقاتق بيتا  $\beta$  .

ج) التحلل بإشعاعات جاما  $\gamma$  .

ويرتبط التحلل بألفا بانطلاق أنوية الهيليوم والتحلل بيتا بتكون وانطلاق الإلكترونات السالبة (نيغاترون) أو الإلكترونات الموجبة (بوزترون) ، وبحدوث عملية اقتصاص للإلكترون  $E.C$  . أما التحلل بجاما فهو انطلاق للأشعة الكهرومغناطيسية الناجمة عن انتقال النواة من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة آخر أقل طاقة وهناك طريقة أخرى للتحلل الإشعاعي وتسمى بالتحول الداخلي  $Internal\ Conversion\ (I.C)$  ، حيث يتفاعل المجال النووي مع الإلكترونات في الأفلاك فتخسر النواة طاقتها ويصاحب هذا تأين إلكترون عوضاً عن انطلاق أشعة جاما . ولاحظ العلماء أن هناك طريقة أخرى تحدث في النوى الثقيلة ( $Z > 91$ ) وتسمى بالانشطار التلقائي  $Spontaneous\ fission\ (S.F)$  حيث تنقسم النواة إلى قسمين متساويين تقريباً . ويصاحب الانشطار انطلاق إشعاعات كهرومغناطيسية ونيوترونات . كما لوحظ في العشرين سنة الماضية بعض طرق التحلل الإشعاعي الغريبة في النوى التي تقع بعيدة عن خط الاستقرار كانطلاق بروتون أو نيوترون .

واقترح العلماء استخدام طريقة مختصرة للتعبير عن التحللات الإشعاعية ،

كما هو موضح في سلسلة  $^{238}\text{U}$  الإشعاعية (شكل 2-1)



كما يمكننا أن نذكر معها أنصاف العمر  $t_{1/2}$  كالآتي :



$^{238}\text{U}$  ( $\alpha$  ,  $4.5 \times 10^9$  سنة)  $^{234}\text{Th}$  ( $\beta^-$  , 24 يوم)  $^{234}\text{Pa}$  ( $\beta^-$  , 1.1 دقيقة)  $^{234}\text{U}$  ( $\alpha$  ,  $2.5 \times 10^5$  سنة) , ....  
 وسوف ندرس طرق التحلل الإشعاعي من خلال طاقة الربط النووي وميكانيكية وحركية التحلل .

## 3-2 قوانين الحفظ Conservation Laws

يجب استيفاء عدد من قوانين الحفظ في التحلل الإشعاعي والتفاعلات النووية، وتضع هذه القوانين الحدود لهذه العمليات ، فلو أخذنا التفاعل التالي :



حيث تمثل  $X$  دقيقة نووية أو أساسية .

ففي التفاعلات النووية تكون  $X_1$  الدقيقة المقذوفة (مثل ذرة  $^4\text{He}$  في حزمة من دقائق ألفا  $\alpha$ ) و  $X_2$  ذرة الهدف (مثل ذرات  $^{14}\text{N}$ ) وأما  $X_3$  و  $X_4$  فهي النواتج (مثل  $^1\text{H}$  و  $^{17}\text{O}$ ) .

وفي بعض الأحيان يتكون ناتج واحد وفي أحيان أخرى يتكون أكثر من ناتجين وتتكون في التحلل الإشعاعي عدة نواتج ولهذا تكتب المعادلة (3-1) كالآتي:



وسوف ندرس قوانين الحفظ المبينة على المعادلة (3-1) .

أ ( الطاقة الكلية Total Energy .

الطاقة الكلية للنظام ثابتة

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4 \quad (3-2)$$

وتمثل  $E$  كل أشكال الطاقة مثل الطاقة الكتلية ، الطاقة الحركية ، الطاقة

الإلكتروستاتيكية ... إلخ .

ب) الزخم الخطي **Linear Momentum** .

$$P = mv \quad (3-3)$$

(المسرع) :  $v$  ، الكتلة :  $m$  )

يجب المحافظة على الزخم الخطي في النظام وذلك بأن يكون :

$$P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \quad (3-4)$$

وتمثل الطاقة الحركية  $E_{kin}$  بدلالة الزخم الخطي كما يلي :

$$E_{kin} = P^2/2m \quad (3-5)$$

ج) الشحنة الكلية **Total Charge** .

الشحنة الكلية للنظام ثابتة ، أي أن :

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \quad (3-6)$$

وتستخدم وحدة الشحنة في التعبير عن الشحنة .

د) العدد الكتلي **Mass Number** .

العدد الكتلي للنظام ثابت ، وهذا يعني أن :

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \quad (3-7)$$

هـ) الزخم الزاوي النووي الكلي  $P_I$  .

**Total Nuclear Angular Momentum  $P_I$**

يجب المحافظة على الزخم الزاوي النووي الكلي للنظام وعلى هذا الأساس فإن :

$$(P_I)_1 + (P_I)_2 = (P_I)_3 + (P_I)_4 \quad (3-8)$$

وبما أن هناك نوعان من الزخم الخطي ، أولهما يتج عن حركة النيوكليونات في

المدار وثانيهما يتج عن الغزل الذاتي للنيوكليونات ويسمى بالزخم الزاوي الداخلي ،

كتب العلماء المعادلة (3-8) بدلالة رقم الكم المغزلي النووي  $I$  على النحو التالي :

$$\Delta I = I_3 + I_4 - I_1 - I_2 \quad (3-9)$$

والقاعدة الكمية تقول بوجود أخذ  $\Delta I$  للقيم التالية :

$$\Delta I = 1, 2, 3, \dots \quad (3-10)$$

وهذا يعني أن للتغير في الغزل النووي لتفاعل ما قيمة عددية صحيحة .  
فالقوانين الثلاثة الأولى ( أ و ب و ج ) موجودة أيضاً في الفيزياء التقليدية  
وأما القانونان ( د و هـ ) فهي خاصة بالتفاعلات النووية .

### 3-3 التحلل ألفا (Alpha Decay)

ينجم عن دقائق ألفا كمية كبيرة من التأين في المادة ، ولو سمح لدقائق ألفا بالمرور عبر غاز ما فإن الإلكترونات الناتجة عن التأين ستجتمع على القطب الموجب وهذا سيؤدي إلى مرور تيار كهربائي . وبنيت عدة أجهزة لقياس ألفا على أساس تأين الغاز كما في حجرات التأين وعدادات التاسب وقد يؤدي تفاعل دقائق ألفا مع المادة إلى حدوث تهيج للجزيئات وقد ينتج عن ذلك الفلورسنس ، وساعد الفلورسنس أو الوميض في دراسة الدقائق النووية . ومن الأجهزة الحديثة المستخدمة للوميض عدادات الوميض Scintillation Counter . ومن المواد الحساسة المستخدمة لهذا الغرض كبريتيد الحارصين (الزنك) الفوسفوري وتكسو هذه المادة سطحاً زجاجياً في الجهاز ، كما أنها تطلق فوتونات في منطقة الضوء المرئي نتيجة لتفاعل دقائق ألفا معها . ويتم الكشف عن الفوتونات باستخدام أجهزة قياس شدة الضوء .

#### 3-3-1 طاقة التحلل Decay Energy

لوحظ التحلل بدقائق ألفا في العناصر الثقيلة والتي لها عدد ذري أكبر من العدد

الذري للرماس ( $Z=82$ ) ، وفي بعض الالاتات . ورمز لنا التحلل بالمعادلة التالية :



والسلاسل النووية خير مثال على هذا التحلل (شكل 2-1) .

وتحسب طاقة التحلل من الكتل الذرية المعروفة ، وذلك لأن مصدر طاقة الربط المنطلقة (التحللات التلقائية النووية مطلقة للطاقة دائماً) هو النقص في الكتلة، ارجع إلى المعادلتين (2-3) و (2-6) .  
وتسمى طاقة التحلل بقيمة  $Q$  للتفاعل .

$$Q(\text{MeV}) = 931.5 \Delta M_A \quad (3-12)$$

وتعرف قيمة  $Q$  لتحلل ألفا ( $\alpha$ ) كما يلي :

$$Q_\alpha = 931.5 (M_Z - M_{Z-2} - M_{\text{He}}) \quad (3-14)$$

وبعني النقص في الكتلة انطلاق للطاقة ، ولهذا نطرح النواتج من المتفاعلات فنحصل على قيمة موجبة لـ  $Q_\alpha$  للتحلل التلقائي . ومن الأمثلة المفيدة :



فإذا كانت كتلة  ${}^{238}\text{U} = 238.050770$  و.ك.ذ. ، و  ${}^4_2\text{He} = 4.002604$

و.ك.ذ. ، و  ${}^{234}\text{Th} = 234.043583$  و.ك.ذ. ، فإن  $Q_\alpha$  تساوي

$$Q_\alpha = 931.5 (238.050770 - 234.043583 - 4.002604)$$

$$Q_\alpha = 4.269 \text{ MeV}$$

فإذا تكونت النواتج في الحالة الأرضية ، وهذا ما يحدث غالباً في التحلل بألفا، توزعت طاقة التحلل الكلية  $Q_\alpha$  إلى طاقة حركية للنواة البنت ( $E_{Z-2}$ ) وطاقة حركية لنواة الهيليوم ( $E_\alpha$ ) ، أي أن  $Q_\alpha$  تساوي :

$$Q_\alpha = E_{Z-2} + E_\alpha \quad (3-15)$$

وبسبب قانوني حفظ الطاقة (معادلة 2-3) وحفظ الزخم (معادلة 3-4) ،

فإن :

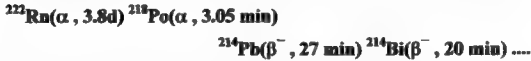
$$E_{z-2} = \frac{Q_\alpha M_\alpha}{M_z} \quad (3-16)$$

وأن

$$E_\alpha = \frac{Q_\alpha M_{z-2}}{M_z} \quad (3-17)$$

وعلى هذا فإن الطاقة الحركية لـ  $^{234}\text{Th}$   $= 0.072 \text{ MeV}$  ، ودقيقة  $\alpha$   $= 4.197 \text{ MeV}$  . أي أن لدقيقة ألفا طاقة حركية أكبر بكثير من الطاقة الحركية للنواة البنت وذلك بسبب الفرق الكبير في الكتلة بين النواة البنت ودقيقة ألفا . وعندما تقارن بين طاقة النواة البنت (72000 eV) وطاقة الربط الكيميائي (أقل من 5eV) يتبين لنا قدرة النواة البنت (النواة المرتدة Recoil Nucleus) على كسر جميع الروابط الكيميائية التي تربطها مع الذرات الأخرى .

وفي عام 1904 لاحظ العالم هـ. بروكس ، أثناء القياسات التي كان يجريها على  $^{218}\text{Po}(\text{RaA})$  ، تلوث حجرة الكشف بـ  $^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$  و  $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$  . وفسر العالم رذرفورد هذا على أساس نواة البنت المرتدة في تحلل  $^{218}\text{Po}$  بألفا التالي:



ويؤدي الارتداد إلى قلب  $^{214}\text{Pb}$  نحو حائط حجرة الكشف . وتستخدم أجهزة الطيف المغناطيسية في قياس طاقة دقائق ألفا بدقة عالية وذلك بالاعتماد على المعادلة التالية :

$$E_\alpha = \frac{2e^2 B^2 r^2}{m_{He}} \quad (3-18)$$

حيث  $e$  هي شحنة الإلكترون و  $B$  هو المجال المغناطيسي و  $r$  هو نصف قطر الانحناء و  $m_{He}$  هي كتلة ألفا .

### 3-4 التحلل بيتا Beta Decay

تحدث الإلكترونات ذات الطاقة العالية تأين وتهيج لجزيئات المادة ولكنه

أضعف وأصعب من تأثير دقائق ألفا . ولهذا لا بد من تضخيم هذا التأثير لتتمكن من عد كل دقيقة من دقائق بيتا . ويستخدم التآين في عدادات التناسب وغايغر ، وأما التهييج فيستخدم في عدادات الوميض .

### 1-4-3 عملية التحلل بيتا $\beta$ -Decay Process

تشتمل عمليات التحلل بيتا على ما يلي :

( أ ) انطلاق الإلكترون السالب (نيغترون)  ${}_{-1}^0e$  أو  $\beta^-$  .

( ب ) انطلاق الإلكترون الموجب (البوزترون)  ${}_{+1}^0e$  أو  $\beta^+$  .

( ج ) اقتصاص الإلكترون (E.C) .

ومن الأمثلة على التحلل بيتا :



ويحدث هذا التحلل بين مستويات كمية محددة في النواة الأب  ${}^{137}\text{Cs}$  والنواة

البنية  ${}^{137}\text{Ba}^m$  .

تحدد المستويات الكمية في النواة بعدة أرقام كمية وأهمها رقم الكم المغزلي النووي Nuclear Spin ، ورقم الكم المغزلي النووي لمسوى  ${}^{137}\text{Cs}$  في الحالة الأرضية هو  $\frac{7}{2}$  ولـ  ${}^{137}\text{Ba}^m$  هو  $\frac{11}{2}$  ، وبما أن الإلكترون من اللقائات الأساسية، فله رقم كم مغزلي  $\frac{1}{2}$  . وكما ذكرنا سابقاً فإنه يجب المحافظة على الزخم الزاوي النووي في التفاعلات النووية (2-3) ، وهذا يعني أن يكون الفرق في الغزل الكلي بين المضاعلات والنواتج مساوياً لقيمة عددية صحيحة في عمليات التحلل الإشعاعي (معادلة 10-3) . وإذا أمعنا النظر في المعادلة السابقة (3-19) اكتشفنا مخالفتها لقاعدة حفظ الغزل ، فمجموع الغزل لـ  ${}^{137}\text{Ba}^m$  والإلكترون يساوي  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  ، ولـ  ${}^{137}\text{Cs}$  هو  $\frac{7}{2}$  .

والفرق في الغزل  $\Delta I = 6 - \frac{7}{2} = \frac{5}{2}$  وحدة غزل ، وهي قيمة عددية غير صحيحة ،

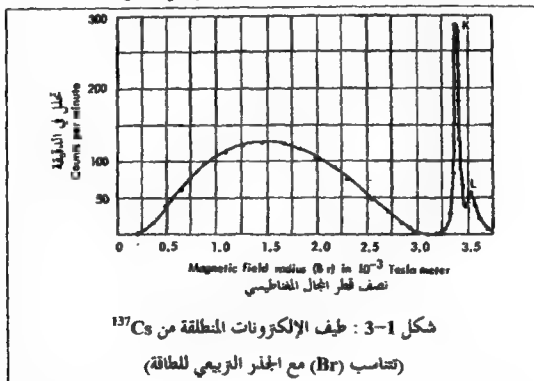
وهذا يخالف قانون حفظ الزخم الزاوي ، فكيف يحدث هذا ؟

وقبل أن نجيب على هذا التساؤل لندرس خاصية أخرى من خصائص بيتا ،

وهذه الخاصية تتعلق بطيف دقائق بيتا ، فلو أخذنا طيف  $^{137}\text{Cs}$  (شكل 1-3)

لاحظنا أن هناك توزيعاً مستمراً للطاقة وهذا يخالف ما قلناه من أن التحلل هو

عبارة عن تغير نواة في مستوى طاقة محدد إلى نواة أخرى في مستوى طاقة محدد .



## 3-4-2 النيوترينو The Neutrino

دفعت مشكلة حفظ الغزل والطيف المستمر العالم باولي W. Pauli إلى

افتراض وجود دقيقة أخرى تنطلق مع دقيقة بيتا سميت بالنيوترينو ويرمز لها بالرمز

٥ . وللنيوتريو كتلة تساوي صفراً وحنة تساوي صفراً وغزلاً يساوي  $\frac{1}{2}$  ، وهي بهذا تشبه الفوتون إلا أنها لا تتفاعل مع المادة كالقوتون ، حتى يقال أنه قد يمر عبر الأرض دون أن يتفاعل .

وقد أتاح غزل النيوتريو التحقق من قانون حفظ الزخم الزاوي ، فنجد في المثال السابق أن قيمة الغزل الكلي للناتج تساوي  $\frac{13}{2} = 1\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$  ، وإذا طرحنا غزل  $^{137}\text{Cs}$   $\frac{7}{2}$  من  $\frac{13}{2}$  ، حصلنا على  $\Delta I = 3$  ، وهذه قيمة عددية صحيحة تتفق مع قانون حفظ الغزل . ونتيجة لما سبق فإننا نكتب تفاعل التحلل (3-19) على النحو التالي :



ويشير الرمز  $\bar{\nu}$  إلى وجود دقيقة تسمى بمضاد النيوتريو . وتبين العلماء أن مضاد النيوتريو يتطلق مع الإلكترون السالب (نيغاترون) والنيوتريو  $\nu$  يتطلق مع الإلكترون الموجب (البوزترون) . كما فسرت نظرية النيوتريو طيف الطاقة لتحلل بيتا وذلك من خلال الكتلة النسبية والكتلة الساكنة . ففي عام 1901 أثبت العالم كوفمات أن كتلة الإلكترون  $m$  تزداد إذا اقربت سرعته ( $V$ ) من سرعة الضوء  $C$  ، وتصبح هذه الزيادة المعادلة التالية :

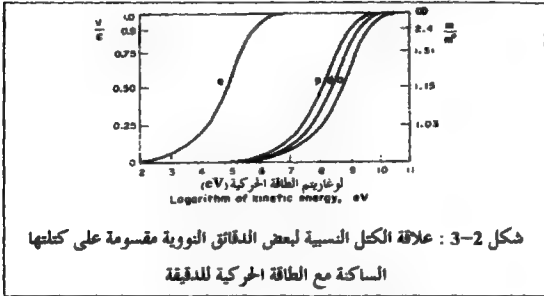
$$m = m^0 \left( 1 - \frac{V^2}{C^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-21)$$

البنية على دراسات هـ. لورينتز للعلاقة ما بين المسافة وسرعة الضوء والزمن .  $m^0$  هي الكتلة الساكنة للدقيقة (عندما تساوي السرعة  $V = 0$  = صفر) ، و  $m$  هي الكتلة النسبية . وتستخدم المعادلة (3-21) في دراسة جميع الأجسام السيارة أكانت ميكروسكوبية أو ماكروسكوبية .



وبين لنا الشكل (3-2) العلاقة ما بين  $\frac{V}{C}$  والطاقة الحركية الدقيقة

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m V^2$$



وإذا طبقنا نظرية ذات الحدين الجبرية على ما في داخل القوس في المعادلة (3-21) نتجت المعادلة التالية (3-22) .

$$m = m^0 + \frac{\frac{1}{2} m^0 V^2}{C^2} \quad (3-22)$$

والمقدار الأول من اليمين عبارة عن الطاقة الحركية مقسومة على سرعة الضوء . أي أن :

$$m \approx m^0 + E_{kin}/C^2 \quad (3-23)$$

وأن الزيادة في الكتلة  $\Delta m$  تساوي  $\Delta m = m - m^0$  ، وهذا يعني أن الطاقة الحركية الدقيقة تساوي

$$E_{kin} = \Delta m C^2 \quad (3-24)$$

وتؤدي هذه المعادلة (3-24) من خلال نظرية أينشتاين النسبية إلى علاقة الكتلة والطاقة المعروفة التالية :

$$E = mc^2 \quad (3-25)$$

والتي استخدمناها في دراسة طاقة الربط النووي .  
يحمل النيوتريو المنطلق من النواة كمية من الطاقة على هيئة طاقة حركية وبناءً على ما جاء في المعادلة (3-23) يمكننا القول أن للنيوتريو كتلة  $m$  أكبر من الصفر وزخم يساوي  $P = mv$  ، وتم إثبات هذا من خلال دراسة الارتداد في تحليل بيتا .  
ومن أجل أن نستخدم المعادلة التالية (معادلة طاقة بيتا  $E_\beta$ )

$$E_\beta = e^2 B^2 r^2 / 2m_e \quad (3-26)$$

بشكل صحيح وجب علينا استخدام الكتلة النسبية ، وبين لنا الشكل (2-2) أن الكتلة النسبية عند طاقة  $0.1 \text{ MeV}$  أكبر بـ 15٪ من الكتلة الساكنة  $m_0$  .  
تتوزع الطاقة المنطلقة في تحليل بيتا ما بين النيوتريو والإلكترون والنواة البنت المرتدة . وطاقة الأخيرة أقل بكثير من النيوتريو والإلكترون مما يسمح بإهمالها .  
أي أن طاقة تحليل بيتا الكلية تتوزع ما بين النيوتريو والإلكترون ، فعلى سبيل المثال إن طاقة التحلل  $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba} + \beta^- + \bar{\nu}$  الكلية تساوي  $Q_\beta = 0.514 \text{ MeV}$  وتسمى بـ  $E_{\max}$  وهي تساوي أعلى قيمة لطاقة بيتا في طيف الطاقة المستمر . فإذا كانت طاقة الإلكترون  $0.400 \text{ MeV}$  فإن طاقة النيوتريو المكتملة تساوي  $0.114 \text{ MeV}$  وإذا كانت طاقة الإلكترون  $0.114 \text{ MeV}$  فإن طاقة النيوتريو تساوي  $0.400 \text{ MeV}$  .  
وقد وجد العلماء أن معدل طاقة  $\beta^-$  يساوي  $0.3 E_{\max}$  تقريباً ومعدل طاقة  $\beta^+$  يساوي  $0.4 E_{\max}$  تقريباً .

### 3-4-3 التحلل بالإلكترون السالب (نيجاترون)

#### Negatron Decay

تمثل المعادلة التالية (3-27) عملية التحلل بالإلكترون السالب



فللنواة البنت شحنة موجبة وذلك لأن عدد الإلكترونات الموروثة من  ${}^A_ZX$  يساوي  $Z$  بينما عدد البروتونات يساوي  $Z+1$  ، ولهذا فإنها تقتصر إلكترون سالب من المحيط لتصبح متعادلة (معادلة 3-28) .



وإذا أمعنا النظر في المعادلة (3-27) نجد أنها موزونة من حيث الإلكترونات وذلك من خلال إضافة الإلكترون المنطلق إلى النواة البنت الموجبة . ولهذا فإننا لا نحسب كتلة الإلكترون المنطلق في حسابنا لطاقة تحلل بيتا  $Q_{\beta}$  ونأخذ كتلة الذرة البنت على أنها متعادلة كما في المعادلة (3-29) .

$$Q_{\beta^{-}} = 931.5(M_Z - M_{Z+1}) \quad (3-29)$$

ومن الأمثلة على ذلك تحلل النيوترون الحُر في الفراغ :



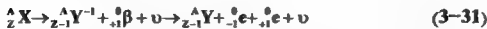
وقيمة  $Q_{\beta^{-}}$  هي :

$$Q_{\beta^{-}} = 931.5 (1.008665 - 1.007825) = 0.782 \text{ MeV}$$

#### 3-4-4 التحلل بالإلكترون الموجب (بوزترون)

##### Positron Decay

تمثل المعادلة التالية عملية التحلل بالإلكترون الموجب (3-31) :



تحمل النواة البنت شحنة سالبة وذلك لأن عدد البروتونات أقل من عدد الإلكترونات الموروثة بواحد . وإذا أخذنا ذرة النواة البنت المتعادلة حصلنا على

الإلكترون سالب في النواتج كما هو مبين في المعادلة (3-31) . ومن الأمثلة على ذلك تحلل  $^{22}_{11}\text{Na}$  حسب المعادلة التالية (3-32) :



وقيمة  $Q_\beta$  هي :

$$Q_\beta = 931.5(M_Z - M_{Z-1} - 2\text{Me}) \quad (3-33)$$

حيث أن  $2\text{Me} = M_{{}^0_{-1}\text{e}} + M_{{}^0_{+1}\text{e}} = 2 \times 0.000549 \text{ و.ك.ذ.}$

$$= 0.001098 \text{ و.ك.ذ.}$$

$$\text{و } 1.022 \text{ MeV} = 931.5 \times 0.001098 \text{ MeV}$$

أي أن كتلة الإلكترون بوحدة  $\text{MeV}$   $0.511 \text{ MeV}$  .

وبتعبير قيم  $M$  من الملحق أ بدلالة  $\Delta$  الزيادة في الكتلة نحصل على ما يلي:

$$\begin{aligned} Q_\beta &= (\Delta_{\text{Ne}} + 22) - (\Delta_{\text{Na}} + 22) - 1.022 \text{ MeV} \\ &= -5.184 + 22 - (-8.026) - 22 - 1.022 \text{ MeV} \\ &= -5.184 + 8.026 - 1.022 \text{ MeV} = 1.820 \text{ MeV} \end{aligned}$$

### 3-4-5 التحلل باقتناص الإلكترون

#### Electron Capture (E.C)

يكتب اقتناص الإلكترون بالطريقة التالية (3-34) .



يأتي الإلكترون المقتص من الأفلاك الداخلية للنواة . وقد ترتبط التسمية

بمستوى الطاقة الرئيسي الذي يقتص منه الإلكترون ، فإذا اقتص من المستوى الطاقة

الرئيسي K سميت باقتناص K وإذا كان المستوى الرئيسي هو L سميت باقتناص L .

أما احتمالية الاقتران من المستوى K فهي أكثر بكثير من تلك من المستوى L ، وذلك لأن دالة الموجة للإلكترونات K أكبر بكثير عند النواة من تلك للإلكترونات L . ويمكننا القول أن احتمالية الاقتران تقل كلما ازدادت  $n$  للمستوى الرئيسي .  
نحسب طاقة التحلل لـ E.C كما يلي :

$$Q_{EC} = 931.5 (M_Z - M_{Z-1}) \quad (3-35)$$

ويتحلل  $^{22}_{11}\text{Na}$  إلى  $^{22}_{10}\text{Ne}$  بطريقة EC أيضاً ونسبة 9.5% . وبالاعتماد على ما جاء في المثال السابق فإن :

$$\begin{aligned} Q_{EC} &= (\Delta_{Na} + 22) - (\Delta_{Ne} + 22) \text{ MeV} \\ &= (-5.184 + 22) - (-8.026 + 22) \text{ MeV} \\ &= -5.184 + 8.026 = 2.842 \text{ MeV} \end{aligned}$$

وهذا يعني أن  $Q_{EC}$  أكبر من  $Q_{\beta}$  بـ 1.022 MeV ويتنافس التحلل بالبوروترون مع التحلل باقتصاص الإلكترون في المنطقة ما بين  $Z = 30$  إلى  $Z = 80$  . أما في منطقة  $Z$  أقل من 30 فيكون التحلل بالبوروترون هو المسيطر وفي منطقة  $Z$  أعلى من 80 فيكون التحلل باقتصاص الإلكترون هو المسيطر .

### 3-4-6 النواة البنت المرتدة Recoiled Daughter

إذا انطلقت دقيقة بيتا والنيوتريو بنفس الزخم ولكن في اتجاهين معاكسين فلن ترتد النواة البنت لأن سرعتها تساوي صفراً وزخمها يساوي صفراً . أما إذا انطلقت في نفس الاتجاه أو كان لأحدهما طاقة تساوي  $E_{max}$  فتحدها سيصل لارتداد النواة البنت إلى أقصى كمية له .  
ونعبر عن هذا بالمعادلة التالية :

$$Q_{\beta} = E_d + E_{max} \quad (3-36)$$

حيث أن  $E_d$  هي طاقة ارتداد النواة البنت . وبالرجوع إلى قانوني حفظ

الطاقة والزخم وإلى التغير النسبي في كتلة الإلكترون فإن  $E_e$  متساوي :

$$E_e = \frac{m_e^0 \cdot E_{\max}}{m_e} + \frac{E_{\max}^2}{m_e c^2} \quad (3-37)$$

وفي الغالب فإن قيمة  $E_e$  تساوي 100 eV ، وهذه الطاقة كافية لإعادة ترتيب الذرات في الجزئيات المحيطة بها .

ففي تحلل  $^{14}\text{C}$  إلى  $^{14}\text{N}$  ،  $E_{\max}$  تساوي 0.155 MeV وتصل قيمة Ed إلى 7 eV . ومن التطبيقات على هذا ما يلي :

يوسم جزئ الإيثان بالكربون 14 كما يلي  $^{14}\text{CH}_3^{14}\text{CH}_3$  ، ثم نتركه ليتحلل فيجد أن جزئ  $^{14}\text{CH}_3\text{NH}_2$  يتكون في 50٪ من الحالات التي تتحلل فيها واحدة من ذرتي  $^{14}\text{C}$  ، على الرغم من أن طاقة الرابطة  $\text{C} \equiv \text{N}$  تساوي 2.1 eV . تحدث معظم التحللات بطاقة أقل من طاقة التردد القصوى والتي قد تتوزع بمعدل ثابت في جميع أنحاء الجزئ . ويفسر التردد القليل ما يحدث في الضاعين التاليين :



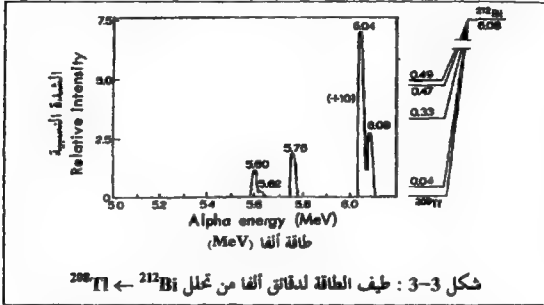
على الرغم من أن Ed تساوي أعشار الإلكترون قولت . وذلك لأن التأثيرات الثانوية تؤدي إلى كسر الروابط الكيميائية بعد حدوث التحلل الإشعاعي .

### 3-5 التحلل بجاما Gamma Decay

نجد في أغلب الأحيان أن النواة البنت الناتجة عن تحلل  $\alpha$  وبنتا في حالة تهيج . وتتخلص النواة البنت من طاقة التهيج إما بإطلاق أشعة جاما أو من خلال العملية المسماة بالتحويل الداخلي Internal Conversion .

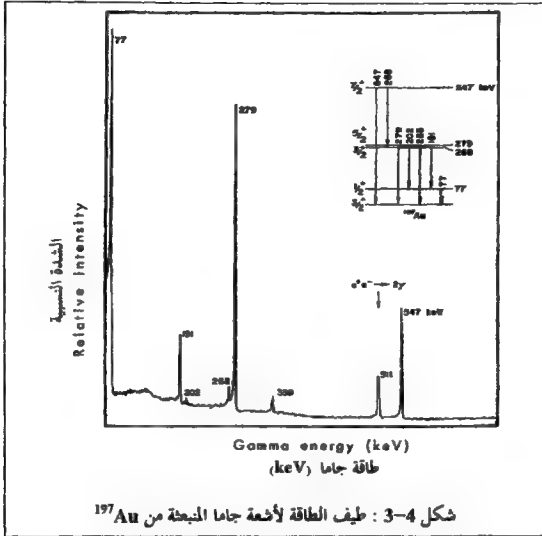
يبين الشكل (3-3) طيف دقائق ألفا المنطلقة من  $^{212}\text{Bi}$  . ويلاحظ من الشكل السابق أن معظم دقائق ألفا طاقة تساوي 6.04 MeV وحوالي 30٪ من الدقائق طاقة أقل أو أكثر . ويمكن تفسير هذا إذا افترضنا أن النوى البنت الناتجة  $^{208}\text{Tl}$  من تحلل

$^{212}\text{Bi}$  موجودة في مسعريات تهيج مختلفة . وأثبتت القياسات لطاقة أشعة جاما المنطلقة هذه الفرضية ، حيث أن طاقة  $\gamma$  تساوي الفرق ما بين أعلى طاقة ألفا  $6.08\text{ MeV}$  وأقل طاقة . فعلى سبيل المثال هناك  $E_\gamma = 0.32\text{ MeV}$  نتيجة لوجود  $E_\gamma = 6.08 - 5.76$  ( $E_\gamma = 6.08 - 5.76\text{ MeV}$  . وبين الشكل (3-3) مسعريات الطاقة في  $^{208}\text{Tl}$  .



يؤدي مرور أشعة جاما في الغاز إلى كثافة تأين قليلة جداً ، فلها لا يمكن عدّها باستخدام عدادات التأين وجيجر والتاسب . بعد ذلك وجد العلماء أن أشعة جاما تؤدي إلى حدوث الفلوريسنس في البلورات كبلورة يوديد الصوديوم  $\text{NaI}$  مما يعني أن إمكانية استخدام عدادات الوميض في عد أشعة جاما بصورة فعّالة . كما يقاس طيف أشعة جاما بدقة عالية بواسطة جهاز كشف شبه موصل صلب . وبين الشكل (3-4) طيف التحلل لمسعريات التهيج المختلفة في  $^{147}\text{Au}$  . وفي معظم الأحيان يحدث انبعاث جاما فوراً بعد تحلل ألفا أو بيتا ، أي في أقل من  $10^{-12}$  ثانية . وفي بعض الحالات تبقى التواة في مسعريات طاقة عالية لفترة من الزمن يمكن قياسها بسهولة ، وتسمى هذه التوى بالأيزومرز (و4-2) ومن الأمثلة على ذلك  $^{60}\text{Co}^{**}$  الذي يحلل بنصف عمر  $10.5$  دقيقة إلى الحالة الأرضية ويسمى هذا التحلل

بالانتقال الأيزومري (IT) Isomeric Transition .



تتوزع طاقة التحلل بكاما ما بين طاقة أشعة جاما ( $E_\gamma$ ) والطاقة الحركية للنواة الناتجة المرتدة ( $E_d$ ) . أي أن  $Q_\gamma$  تساوي :

$$Q_\gamma = E_d + E_\gamma \quad (3-40)$$

ويتبع التوزيع المعادلة التالية :

$$E_d = E_\gamma^2 / 2m_d C^2 \quad (3-41)$$

وتقدر طاقة  $E_d > 0.1\%$  من  $E_\gamma$  . أي أن الطاقة الحركية للنواة المرتدة قليلة



جداً ويمكن إهمالها عند دراستنا لطاقة أشعة جاما .

ويمكن لأشعة جاما أن تتفاعل مع الإلكترونات الأفلاك التابعة لفترات أخرى ، مما يؤدي إلى طرد هذه الإلكترونات من فرائها حاملة معها طاقة حركية محددة . وقد تحدث هذه العملية ضمن نفس الذرة المثيجة . وتسمى هذه العملية بالتحويل الداخلي IC . وذلك بسبب تداخل دالة الموجة للإلكترون الفلك مع تلك الخاصة بالنواة المثيجة ، وينجم عن هذا انتقال طاقة التهيج للنواة مباشرة إلى إلكترون الفلك ، والذي سيهرب من الذرة بطاقة حركية  $E_e$  . ولا تنطلق أشعة جاما في التحويل الداخلي ، وبهذه الطريقة تخسر النواة المثيجة طاقتها .

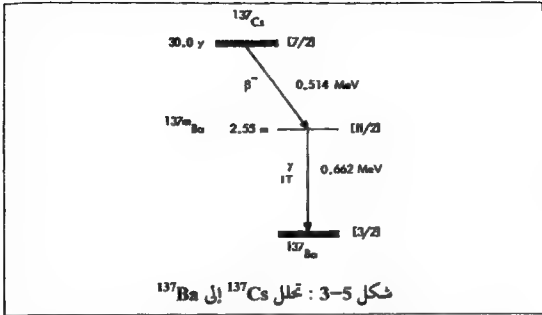
وتكتب معادلة التحويل الداخلي كما يلي :



ويستخدم جزء من طاقة التهيج النووي في التغلب على طاقة الربط  $E_{be}$  للإلكترون الفلك ، أما الباقي من طاقة التهيج فيتوزع ما بين طاقة الإلكترون الحركية  $E_e$  وطاقة النواة البنت المرتدة  $E_R$  ، أي أن :

$$Q_\gamma = E_{be} + E_R + E_e \quad (3-43)$$

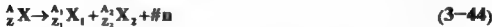
ويسمى الإلكترون المطلق بالإلكترون التحويل Conversion Electron وفي الغالب تأتي هذه الإلكترونات من الأفلاك الداخلية للذرة وذلك لأن الدالة الموجية لهم تتداخل بشكل كبير مع تلك للنواة . ولإلكترونات التحويل طاقة ثابتة  $E_e$  تعتمد على طاقة ربط الإلكترون في الفلك ، وتعكس قيم  $E_e$  الفرق في طاقة ربط الإلكترونات .



وبين الشكل (3-1) وجود قمتين ، الأولى رمز لها بـ K وتمثل إلكترونات التحول القادمة من مستوى الطاقة الرئيسي K والثانية رمز لها بـ L وتمثل إلكترونات التحول القادمة من مستوى الطاقة الرئيسي L . ويتبع كل هذا من تحلل  $^{137}\text{Ba}^m$  . وبين الشكل (3-5) عملية تحلل  $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba} + \beta^-$  . ويتحلل  $^{137}\text{Ba}^m$  بطريقتين ، الأولى بإطلاق أشعة جاما بطاقة 0.66 MeV والثانية المنافسة للأولى بالتحول الداخلي . وتسمى النسبة ما بين عدد إلكترونات التحول وعدد فوتونات  $\gamma$  المنطلقة في المنافسة بنسبة التحول Conversion Ratio  $\alpha$  . وتعني  $\frac{I_{\text{eK}}}{I_{\gamma}} = \alpha_K$  النسبة ما بين إلكترونات K المنطلقة ( $I_{\text{eK}}$ ) وفوتونات  $\gamma$  المنطلقة  $I_{\gamma}$  . وفي الغالب فإن قيمة  $\alpha_K > 0.1$  وأن  $\alpha_M < \alpha_L < \alpha_K$  ... إلخ . أما في  $^{137}\text{Ba}^m$  فإن  $\alpha_K = 0.004$  وأن النسبة ما بين عدد إلكترونات التحول من K إلى عدد إلكترونات التحول من L تساوي 5 تقريباً .

### 3-6 الانشطار التلقائي (SF) Spontaneous Fission

إذا ازدادت شحنة النواة إلى قيم عالية ، نجم عن ذلك زيادة في عدم استقرار النوى ، ونلاحظ هذا في قيم نصف العمر للعناصر الثقيلة ، التي لها عدد ذري أكثر من اليورانيوم ( $Z = 92$ ) إذ تقل كلما ازداد العدد الذري . وفي عام 1940 اكتشف العالمان بيرجك وفليسوف أن هناك طريقة أخرى لتحلل اليورانيوم  $^{238}\text{U}$  الإشعاعي بالإضافة إلى دقائق ألفا وهي الانشطار التلقائي (SF) وأن هناك تنافساً بين الطريقتين . ويتبع عن الانشطار التلقائي جزئين قليلين (نواتج الانشطار) بالإضافة إلى بعض النيوترونات كما هو مبين في المعادلة التالية :



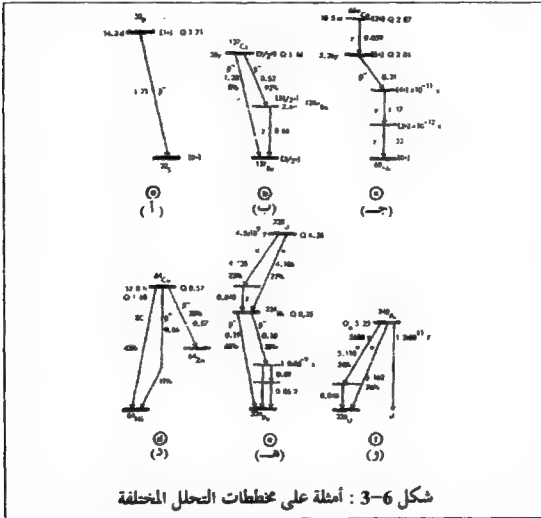
حيث أن # هو عدد النيوترونات والذي يساوي من 2 إلى 3 نيوترونات . وأما قيمة نصف العمر للانشطار التلقائي ( $t_{1/2\text{SF}}$ ) لليورانيوم 238 فتساوي  $8 \times 10^{15}$  سنة وهذه القيمة أكبر بكثير من  $t_{1/2}$  لتحلل ألفا . أي أن هناك حوالي 70 انشطار تلقائي في الثانية في 1 كغم  $^{238}\text{U}$  وفي المقابل هناك انطلاق لـ  $45 \times 10^9$  دقيقة من ألفا .

وكلما ازدادت Z ازداد الانشطار التلقائي فتقصت قيمة  $t_{1/2}$  له . ومن الأمثلة على ذلك  $t_{1/2\text{SF}} = 1.2 \times 10^{11}$  سنة  $^{240}\text{Pu}$  و  $1.4 \times 10^7$  سنة  $t_{1/2\text{SF}} =$   $^{256}\text{Fm}$  و 66 سنة  $t_{1/2\text{SF}} =$   $^{252}\text{Cf}$  و  $3 \times 10^{-4}$  سنة  $t_{1/2\text{SF}} =$   $^{256}\text{Fm}$  . وفي الحقيقة فإن الانشطار التلقائي يصبح المسيطر في العناصر الأكثر ثقلاً ( $Z > 100$ ) . وهناك وجه شبه بين الانشطار التلقائي وغير التلقائي الناجم عن قذف النوى بنيوترونات ذات طاقة قليلة .

### 3-7 مخططات التحلل وخريطة النظائر

#### Decay Schemes and Isotope Charts

يُحصل القارئ من مخططات التحلل على المعلومات التالية : غط (طريقة)  
التحلل وطاقة التحلل وفترة نصف العمر وبين الشكل (3-6) عدد من مخططات  
التحلل .



تكتب فترة نصف العمر  $t_{1/2}$  إلى يسار الخط الذي يمثل مستوى الطاقة للنواة  
التحللة ، وتعطى قيمة الغزل النووي لكل مستوى على يمين المستوى وداخل

قوسين مربعين . وفي نفس الجهة تعطى قيمة  $Q$  لذلك التحلل . وتستخدم الرموز المعروفة التالية  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  و  $E.C$  للدلالة على طريقة التحلل ، ويكتب إلى جانبها طاقة ذلك التحلل والنسبة المئوية له .

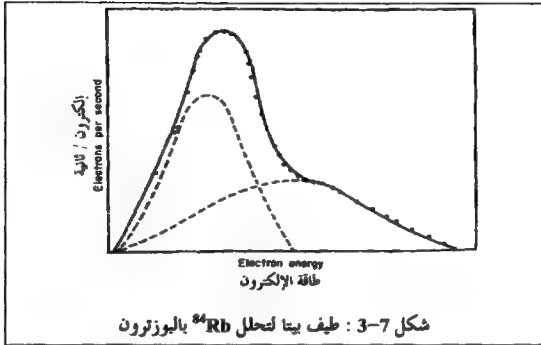
يمثل الشكل (3-6 أ) تحلل  $\beta^-$  لـ  $^{32}P$  ، أما (3-6 ب) فيمثل مخطط التحلل لـ  $^{137}Cs$  والذي يختلف عن الشكل (3-5) والمنحنى في (3-1) . والسبب يعود إلى أن نسبة الإلكترونات المنطلقة بطاقة  $1.2 \text{ MeV}$  قليلة تساوي 8٪ فقط ولهذا فإنه من الصعب الكشف عنها في جهاز الطيف المغناطيسي . ومن الشائع أن نجد نوى تتحلل بأكثر من طريقة تحلل تتنافس فيما بينها كما هو في المثال (3-6 ب) . وإذا كانت نسبة تحلل بيتا ذات الطاقة العالية قريبة من تلك ذات الطاقة القليلة حصلنا على طيف مشترك لبيتا كما هو مبين في الشكل (3-7) .

يبين الشكل (3-6 ج) مخطط التحلل لـ  $^{60}Co$  ولأيزومره  $^{60}Co^m$  . ويلاحظ وجود تحللان لغاما مباشرة بعد التحلل بيتا .

أما الشكل (3-6 د) فيوضح ظاهرة التحلل المتفرع لـ  $^{64}Cu$  ، حيث أنه يتحلل بالنيوترون ونسبته (38٪) وبالپوزوترون ونسبته (19٪) وباقتران الإلكترون (43٪) ويلاحظ أيضاً أن  $Q_{EC}$  أكبر من  $Q_{\beta^-}$   $1.68 - 0.66 = 1.02 \text{ MeV}$  . وأما الشكل (3-6 هـ) فيوضح تحلل  $^{238}U$  بألفا إلى  $^{234}Th$  وتحلل  $^{234}Th$  بيتا سالب إلى  $^{234}Pa$  .

وأخيراً يبين الشكل (3-6 و) التنافس ما بين الانشطار التلقائي والتحلل بألفا في  $^{240}Pu$  .

وأما خريطة النظائر (ملحق ب) فتمثل كل النظائر المعروفة لحد الآن وهي مفيدة جداً في التعرف السريع على صفات كل نظير وعلى نتائج التحللات .



### 3-8 العمليات والتفاعلات الثانوية في الذرة

#### Secondary Process in the Atom

إذا انطلق إلكترون من فلك ذري بسبب التحول الداخلي (IC) أو اقتصاص الإلكترون (EC) أو أي تفاعل ناجم عن التحلل الإشعاعي، تكون فراغ في ذلك الفلك. ويجب أن يملأ هذا الفراغ بعدة طرق منها قدوم إلكترون من فلك له طاقة أعلى ليحل الفراغ. وأما الفرق في طاقة الربط بين الفلكين فتظهر على شكل أشعة إكس. وتسمى هذه العملية بإشعاع الفلورسنت **Flourescent Radiation**.

وإذا كان الفرق في طاقة الربط أكثر من طاقة الربط للإلكترون في المستوى  $L$  أو  $M$  ظهرت عملية منافسة لإشعاع الفلورسنت تسمى بعملية الكهروضوئية الداخلية، حيث يطلق ذلك الإلكترون حاملًا معه الفائض من الفرق في طاقة الربط عن طاقة ربطه، وهذا يعني

انطلاق إلكترونات من الأنفلاك العليا ذات طاقة حركية قليلة وتسمى هذه الإلكترونات بالإلكترونات آوجه Auger Electrons . وإذا قلنا بين طاقة هذه الإلكترونات المنطلقة وطاقة الإلكترونات المنطلقة من الصول الداخلي التروي ، نجد أن طاقتها قليلة وفي حدود eV بينما طاقة الإلكترونات الناتجة عن IC في حدود MeV . وينجم عن انطلاق إلكترونات آوجه في الذرة شحنة موجبة عالية قد تصل من 10 إلى 20 وحدة شحنة . وإذا تم معادلة هذه الشحنة العالية نجم عن ذلك طاقة عالية تكفي لكسر الروابط الكيميائية.

وجد العلماء أن طاقة  $\gamma$  في التحلل الأيزومري (IT) قليلة ، مما يعني أن طاقة الارتداد للبنات معدومة . ومن الأمثلة على ذلك :



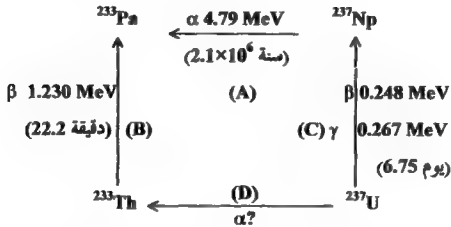
وطاقة  $\gamma$  هي 0.049 MeV وطاقة الارتداد للبنات هي 0.016 eV . وعلى الرغم من ذلك يؤدي التحلل إلى انطلاق  $^{80}\text{Br}$  من جزيء بروميد الإيثيل  $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$  المحصوي على  $^{80}\text{Br}^m$  ( $\text{C}_2\text{H}_5^{80}\text{Br}^m$ ) ، علماً أن طاقة الرابطة  $\text{C}-^{80}\text{Br}^m$  تساوي 2.3eV . وينجم هذا عن التحول الداخلي لجاما الذي ينتج عنه فراغ ومن ثم انطلاق إلكترونات آوجه . وهذا سيؤدي إلى تكون أيونات بروم موجبة تتزاوح من  $\text{Br}^+$  إلى  $\text{Br}^{17+}$  . وانطلاق  $^{80}\text{Br}$  ناجم عن الطاقة الناتجة عن معادلة هذه الشحنة الموجبة العالية ، وهذه الطاقة كافية لكسر الرابطة  $\text{C}-^{80}\text{Br}$  .

### 3-8 طاقة حلقة التحلل المغلقة

#### Closed Decay Energy Cycles

لم يتمكن العلماء من قياس الكتلة للنظائر المشعة ذات نصف العمر القليل على الرغم من أن طاقة وطريقة التحلل قد تم التعرف عليهما وتحديدتهما . وإذا استخدمنا طاقة

حلقة التحلل المغلقة حصلنا على الكتل النووية وقيم Q لطرق تحلل مختلفة وغير معروفة .  
 فإذا أردنا معرفة ما إذا كان  $^{237}\text{U}$  يتحلل إلى  $^{233}\text{Th}$  بواسطة ألفا دون معرفتنا للكتل النووية . قمنا ببناء الحلقة التالية : يتحلل  $^{233}\text{U}$  بيتا ( $E_{\max} 0.248$  MeV) ومن ثم بجاما ( $E_{\gamma} 0.267$  MeV) ، يتحلل  $^{233}\text{Th}$  بيتا ( $E_{\max} 1.230$  MeV) إلى  $^{233}\text{Pa}$  ، يتحلل  $^{237}\text{Np}$  بألفا إلى  $^{233}\text{Pa}$  بطاقة  $E_{\alpha} 4.79$  MeV .



فقيمة Q للفرع D  $(M_{^{237}\text{U}} - M_{\text{He}} - M_{^{233}\text{Th}}) = D$  ، وأما Q للفرع (A) فتساوي  $\frac{E_{\alpha} M_Z}{M_{Z-2}} = 4.79 \frac{237}{233} = 931.5 (M_{^{237}\text{Np}} - M_{\text{He}} - M_{^{233}\text{Pa}})$  .  
 Q . وبالتعويض بقيم  $M_{\text{He}}$  و  $M_{^{237}\text{Np}}$  نحصل على  $M_{^{233}\text{Pa}} = 233.040108$  .  
 وقيمة  $M_{^{233}\text{Th}}$  للفرع (B) تساوي

$$M_{^{233}\text{Th}} = M_{^{233}\text{Pa}} + \frac{1.230}{931.5} = 233.041428$$

ومن الفرع (C) نحصل على

$$M_{^{237}\text{U}} = M_{^{237}\text{Np}} + (0.248 + 0.267)/931.5 = 237.048581$$



أي أن جميع المعلومات قد توفرت لحساب القصر (D) ، وقيمة Q له 4.23 MeV و  $E_{\alpha} = 4.23 \times \frac{233}{237} = 4.16 \text{ MeV}$  ، أي أن التحلل ألفا ممكن من ناحية الطاقة ، ولكن لم يتم الكشف عنه بعد وقدر العلماء نصف العمر له بأكثر من  $10^6$  سنة ، ويعزى هذا إلى سرعة التحلل بيتا ( $t_{1/2} = 6.75$  يوم) العالية مما يجعل التحلل بيتا هو المسيطر على التحلل ألفا .

### الأسئلة :

- 1) إذا علمت أن  $^{239}\text{Pu}$  يطلق دقائق ألفا بطاقة قصوى تساوي 5.152 MeV ، فاحسب طاقة الارتداد للتوابع .
- 2) يتحلل  $^{11}\text{C}$  بإطلاق البوزترونات وبطاقة قصوى تساوي 1.0 MeV ، احسب طاقة الارتداد للبت .
- 3) يتحلل  $^{16}\text{N}$  إلى  $^{16}\text{O}$  بيتا ناقص ، فإذا انطلقت أشعة جاما بعد ذلك ، وكانت أعلى طاقة لها 6.14 MeV ، فاحسب طاقة الارتداد لـ  $^{16}\text{O}$  .
- 4) احسب Q لكل من :
  - أ) تحلل  $^{14}\text{C}$  إلى  $^{14}\text{N}$  بواسطة  $\beta^-$  .
  - ب) تحلل  $^{234}\text{Th}$  إلى  $^{230}\text{Ra}$  بواسطة  $\alpha$  .
  - ج) تحلل  $^{86}\text{Rh}$  بواسطة  $\beta^+$  و E.C .
  - د) تحلل  $^{99}\text{Tc}^m$  إلى  $^{99}\text{Tc}$  بواسطة  $\gamma$  .
- 5) إذا كانت طاقة الربط للإلكترون K في الباريوم 37441 eV . فاحسب من الشكل (3-1) طاقة التحول الداخلي لـ  $^{137}\text{Ba}^m$  (الشكل 3-5) .
- 6) إذا انشطر  $^{240}\text{Pu}$  إلى  $^{118}\text{Ag}$  حسب المعادلة التالية :
 
$$^{240}_{94}\text{Pu} \rightarrow 2^{118}_{47}\text{Ag} + 4n$$
 فاحسب Q للانشطار التلقائي .

## الفصل الرابع

### معادلات تحلل ونمو النشاط الإشعاعي

### EQUATIONS OF RADIOACTIVE DECAY AND GROWTH

#### 4-1 مقدمة

وضع العالم أي. فون. شربلر عام 1905 وصف جديد لعملية التحلل الإشعاعي مبني على احتمالات التحلل . فقال أن احتمالية التحلل ( p ) للنواة معينة من عنصر مشع في فترة زمنية  $\Delta t$  لا تعتمد على تاريخ العينة ولا على الظروف الحالية ، وتعتمد فقط على طول الفترة الزمنية  $\Delta t$  ، وفي حال قصر الفترة الزمنية فإنها تتناسب طردياً مع  $\Delta t$  . أي أن :

$$P = \lambda \Delta t \quad (4-1)$$

و  $\lambda$  هو ثابت التناسب (ثابت التحلل) ، ولكل نواة مشعة قيمة لـ  $\lambda$  خاصة بها . واحتمالية أن لا تتحلل ذرة معينة خلال الفترة القصيرة  $\Delta t$  يساوي :

$$1-P = 1-\lambda \Delta t \quad (4-2)$$

وإذا لم تتحلل تلك النواة خلال الفترة الأولى فإن احتمالية تحللها في الفترة القادمة تساوي  $1-\lambda \Delta t$  وهكذا لفترات قادمة . أما احتمالية أن لا تتحلل تلك النواة خلال عدد  $n$  من الفترات فيساوي  $(1-\lambda \Delta t)^n$  . ويعويض الزمن الكلي  $n \Delta t = t$  في المعادلة  $(1-\lambda \Delta t)^n$  حصلنا على احتمالية للبقاء تساوي :

$$\left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n \quad (4-3)$$

واحتمالية أن لا تغير النواة بعد زمن  $t$  يساوي قيمة المقدار (4-3) على شرط أن تكون  $\Delta t$  صغيرة جداً . وهذا يساوي نهاية  $\left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n$  عندما نؤول  $n$  إلى ما لا نهاية . وبالرجوع إلى قيمة  $e^x$  والتي تساوي  $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{x}{n}\right)^n$  ، فإن

القيمة المحددة تساوي  $e^{-\lambda t}$  .

وإذا أخذنا بالاعتبار عدد كبير من الذرات  $N_0$  في البداية ، فإن الجزء الباقي بدون تغير بعد زمن  $t$  سيساوي :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (4-4)$$

حيث أن  $N$  هو عدد الذرات الباقي الذي لم يتغير بعد زمن  $t$  و  $N_0$  عدد الذرات عند زمن صفر  $t = 0$  .

وتمثل المعادلة (4-4) قانون التحلل الأسّي الذي يتطابق مع ما وجدته العالم رذرفورد عملياً عند دراسته لنشاط عينة مشعة معزولة ونقية .

ويمكننا أن نشق القانون (4-4) بطريقة أخرى مبنية على علاقة سرعة التحلل  $-\frac{dN}{dt}$  الطردية مع عدد الذرات  $N$  . وإذا متخذنا ثابت التناسب  $\lambda$  حصلنا على المعادلة التالية :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (4-5)$$

وبتكامل الطرفين حسب الشروط السابقة ( $N = N_0$  عند صفر  $t = 0$ ) نحصل على  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  .

ولثابت التحلل  $\lambda$  (ثابت التناسب سابقاً) وحدة معكوس الزمن . ولا يتغير ثابت التحلل لنظير ما مشع مهما تغيرت ظروف التجربة مثل درجة الحرارة والصفة الكيميائية والضغط والمجال الأرضي والمغناطيسي والكهربائي .

وتعرف فترة نصف العمر  $t_{1/2}$  رياضياً كما يلي : عندما تساوي  $t = t_{1/2}$  فإن

$$N = \frac{N_0}{2} , \text{ وبالتعويض في المعادلة (4-4) نحصل على :}$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (4-6)$$

وباختصار  $N_0$  من الطرفين ثم أخذ اللوغاريتم للطرفين نحصل على :

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \quad (4-7)$$

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2} \quad (4-7) \text{ أو}$$

وبتعيين قيمة  $\ln 2 = 0.693$  في المعادلة (4-7) ، فإن :

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (4-8)$$

لا يمكن عملياً تحديد عدد ذرات المادة المشعة  $N$  بطريقة مباشرة ، ولا حتى قياس سرعة التحلل المطلقة . وإنما يجري تحديد كمية تتناسب طردياً مع  $\lambda N$  وتسمى بالنشاط Activity  $A$  ، أي أن :

$$A = \lambda N = C \left( \frac{-dN}{dt} \right) \quad (4-9)$$

حيث أن  $C$  هو ثابت التناسب أو معامل الكشف Detection coefficient الذي يعتمد على طبيعة أداة الكشف وعلى فعالية الأداة في الكشف عن الإشعاعات وعلى الترتيب الهندسي للعينة وللكاشف . ولهذا يتصح الدارس على إبقاء هذه العوامل ثابتة خلال القياسات .

يمكننا أن نكتب قانون التحلل الأسّي (معادلة 4-4) بدلالة النشاط الإشعاعي كما يلي :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4-10)$$

ويستخدم الرسم البياني للعلاقة بين  $\log A$  والزمن  $t$  في حساب فترة نصف العمر  $t_{1/2}$  لبعض النظائر .

## 4-2 معدل العمر Average Life (T)

يمكن حساب معدل العمر المتوقع لذرات أي عنصر مشع من خلال جمع أعمار كل الذرات وقسمته على عدد الذرات الأصلي . فإذا كان عدد الذرات  $N$  كبير جداً فإن معدل العمر سيساوي التكامل التالي :

$$\begin{aligned}
T &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt \\
&= \lambda \int_0^{\infty} t \frac{N}{N_0} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \\
&= -\left[ \frac{\lambda t + 1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}
\end{aligned} \tag{4-11}$$

أي أن معدل العمر أكبر من نصف العمر بمقدار  $\frac{1}{0.693}$  . كما أن النشاط الإشعاعي ينقص خلال فترة معدل العمر إلى  $\frac{1}{e}$  من قيمته الأصلية . فمعدل العمر

$$T_{1/2} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.693} = \frac{1}{0.693} = 8268.4 \text{ سنة} \quad \text{لـ } ^{14}\text{C} \text{ هو :}$$

$\frac{1}{t_{1/2}} \quad 5730 \text{ سنة}$

### 4-3 تحليل المخاليط المشعة

#### Decay of Radioactive Mixtures

تعرف المخاليط المشعة على أنها مخلوط من مادتين أو أكثر مشعة ومستقلة في التحلل الإشعاعي عن بعضها البعض .

فلو افترضنا أن المخلوط مكون من مادتين 1 و 2 . فإن النشاط الإشعاعي الكلي A سيساوي مجموع النشاط الإشعاعي لكل من 1 و 2 كما يلي :

$$A = A_1 + A_2 \tag{4-12}$$

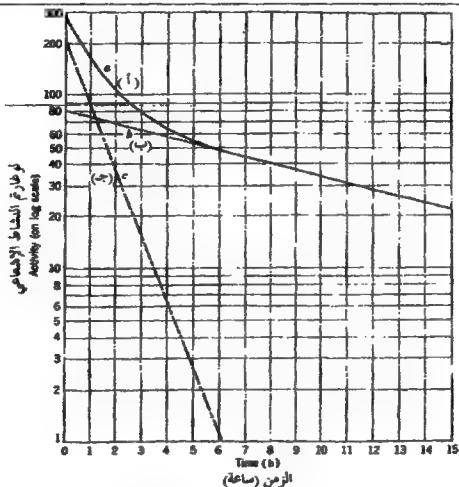
أي أن :

$$A = C_1 \lambda_1 N_1 + C_2 \lambda_2 N_2 \tag{4-13}$$

حيث أن  $C_1$  و  $C_2$  هما معاملي الكشف لـ 1 و 2 ، وليس من الضروري أن تكون  $C_2 = C_1$  ، وفي أغلب الأحيان هناك فرق كبير . وبشكل عام فإن النشاط الإشعاعي الكلي لعينة مخلوط مكونة من n مادة مشعة هو :

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots + A_n \quad (4-14)$$

فإذا أخذنا المخلوط الأول (معادلة 12 و 4-13) ورمزنا  $\log A$  (لوغاريتم النشاط الإشعاعي الكلي) ضد الزمن  $t$  حصلنا على منحنى مغلب (الشكل 4-1). ويتبع الانحواء عن التحلل السريع للنظير ذا نصف العمر القصير ، مما يقلل من أهميته مع مرور الزمن ويزيد من أهمية النظير ذا نصف العمر الطويل. ولهذا يظهر الجزء الأخير من المنحنى وكأنه خط مستقيم.



شكل 4-1 : تحليل منحنى التحلل لمخلوط

( أ ) منحنى تحلل المخلوط (ب) النظير ذا العمر الطويل ( $t_{1/2} = 8$  ساعة)  
(ج) النظير ذا العمر القصير ( $t_{1/2} = 0.8$  ساعة)

وتحسب  $t_{1/2}$  مباشرة من ميل هذا الخط والعلاقة (4-8) .

ويمكن حساب  $\log A$  من تقاطع امتداد الخط المستقيم مع محور ص عند صفر  $t = 0$  . ومن معرفتنا لقيمة  $\log \frac{A_{\text{الوقت}}}{2}$  نحسب  $t_{1/2}$  لذلك النظر بطريقة أخرى . وإذا تم طرح امتداد الخط المستقيم من المنحنى حصلنا على تحليل جميع المكونات ما عدا النظر ذا العمر الطويل . وفي حال وجود مكون آخر فقط فإنه يمكن الحصول على خط مستقيم يمثل تحليل النظر ذا العمر القصير ، وذلك برسم لوغاريتم (حاصل الطرح) ضد الزمن كما هو مبين في الشكل (4-1) . ومن الصعب تحليل المنحنى إلى مكوناته إذا كان الفرق في نصف العمر لا يقل عن الضعف ، ويبين الشكل (4-1) منحنى مكون من نظيرين والفرق بينهم عشرة أضعاف .

اقترح العلماء الطريقة الرياضية التالية لتحليل منحنى مكون من نظيرين هما أنصاف أعمار معروفة ولكن قريبة من بعضها البعض .

النشاط الإشعاعي الكلي عند زمن  $t$  يساوي

$$A = A_1^0 e^{-\lambda_1 t} + A_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (4-15)$$

وإذا ضربنا طرفي المعادلة بـ  $e^{\lambda_1 t}$  حصلنا على

$$A e^{\lambda_1 t} = A_1^0 + A_2^0 e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} \quad (4-16)$$

وبما أن  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  معروفان وقيم  $A$  مقاسة مع الزمن ، نستطيع أن نرسم  $A e^{\lambda_1 t}$  ضد  $e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}$  فنحصل على خط مستقيم بميل يساوي  $A_2^0$  وتقاطع يساوي  $A_1^0$  .



## 4-4 نمو النواتج المشعة

### Growth of Radioactive Products

#### 4-4-1 المعادلة العامة :

لندرس الحالة العامة لتحلل مادة مشعة (1) والتي تعطي بنت مشعة (2) .

فالمعادلات التي تحكم  $N_1$  هي :

$$-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \quad \text{و} \quad N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

أما البنت المشعة فإنها تتحلل بسرعة  $\lambda_2 N_2$  وتنمو بسرعة  $\lambda_1 N_1$  ، أي أن

معدل التغير في  $N_2$  مع الزمن هو :

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (4-17)$$

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = \text{صفر} \quad \text{أو}$$

وحل هذه المعادلة هو :

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (4-18)$$

حيث أن  $N_2^0$  هي قيمة  $N_2$  عند صفر  $t$  . وبين المقدار الأول العلاقة بين نمو

البنت من الأب والتحلل الإشعاعي الخاص فيها وأما المقدار الثاني فهو تحلل ذرات البنت الموجودة أصلاً ، وعندما تكون عينة الأب نقية كيميائياً فإن  $N_2^0$  متساوي صفرأ .

#### 4-4-2 الاتزان العابر Transient Equilibrium

إذا كان نصف عمر الأب أكبر من نصف عمر البنت ( $t_{1/2}(1) < t_{1/2}(2)$  أو

$\lambda_1 < \lambda_2$ ) وجدت حالة من الاتزان في التحلل الإشعاعي ، حيث تثبت النسبة بين

عدد الذرات أو سرعة التحلل الأب إلى البنت بعد مرور زمن معين . وتوضح

هذه الحالة من خلال المعادلة (4-18) كما يلي : فعندما يصل الزمن  $t$  إلى قيمة كبيرة فإن  $e^{-\lambda_1 t}$  تصبح عدية القيمة بالمقارنة مع  $e^{-\lambda_2 t}$  فنأخذ المعادلة (4-18) صيغة جديدة هي (4-19) .

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (4-19)$$

وبالتعويض في مكان  $N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$  بـ  $N_1$  نحصل على :

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \quad (4-20)$$

وبدلالة النشاط الإشعاعي نحصل على

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{C_1(\lambda_2 - \lambda_1)}{C_2 \lambda_2} \quad (4-21)$$

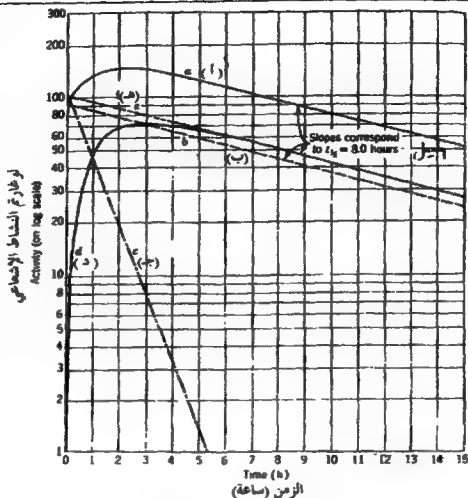
حيث أن  $A_1 = C_1 \lambda_1 N_1$  و  $A_2 = C_2 \lambda_2 N_2$  .

وفي حال أن  $C_2 = C_1$  فإن :

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} = 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (4-22)$$

وتأخذ النسبة  $\frac{A_1}{A_2}$  قيم من  $0 \leftarrow 1$  بالاعتماد على نسبة  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  .

ففي الاتزان يرتبط تحلل الأب والبنات الإشعاعي بنصف عمر الأب . وبين الشكل (4-2) الاتزان العابر ، ونلاحظ من الشكل (4-2) كيف أن مجموع سرعتي التحلل للأب والبنات الناجمة عن عينة من الأب نقية كيميائياً تزداد إلى أقصى قيمة لها قبل أن تصل إلى الاتزان العابر . وشرط القيمة القصوى هو أن تكون  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} < \frac{C_2}{C_1}$  . بغض النظر عن قيم  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  .



شكل 2-4 : الاثران العابر

(أ) النشاط الكلي لعينة من الأب نقية كيميائياً عند الزمن = صفر .

(ب) النشاط للأب فقط ( $t_{1/2} = 8$  ساعة) .

(ج) التحلل الإشعاعي لعينة البنت المعزولة والنقية ( $t_{1/2} = 0.80$  ساعة) .

(د) غو النشاط الإشعاعي للبنت من أب نقي .

(هـ) النشاط الإشعاعي الكلي للبنت في العينة التي تحتوي على الأب والبنت .

### 4-4-3 Secular Equilibrium الاتزان القرني

تحدث هذه الحالة المحددة من الاتزان عندما تكون  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  أو  $t_{1/2}(1) \gg t_{1/2}(2)$  . فلا يتقص النشاط الإشعاعي للأب خلال فترة نصف العمر أو فترات نصف العمر للبنت .

وإذا استخدمنا المعادلة (20-4) وطبقنا عليها الشرط  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  ، فإن

$$\lambda_1 \approx \lambda_2 \quad \text{أي أن :}$$

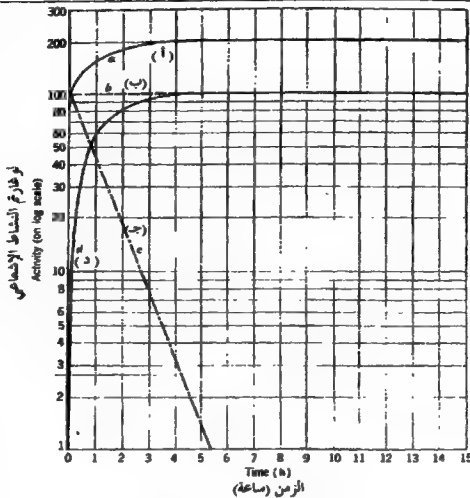
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (4-23)$$

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 \quad \text{أو (4-23)}$$

وبالتعويض بدلالة النشاط الإشعاعي نحصل على :

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (4-24)$$

وإذا كانت  $C_2 = C_1$  فإن  $A_1 = A_2$  وبين الشكل (3-4) الاتزان القرني ، ونلاحظ من الشكل كيف أن النشاط الإشعاعي للأب ثابت لا يتغير ضمن الزمن الذي يساوي مضاعفات لفترة نصف عمر البنت . ويتبع مجموع النشاط الإشعاعي للأب والبنت نفس تصرف الأب . وكلما أصبحت  $\lambda_1$  أصغر من  $\lambda_2$  اقرب الاتزان العابر من الاتزان القرني .



شكل 3-4 : الاتزان القرني

- أ) النشاط الكلي لعينة من الأب نقية كيميائياً عند الزمن = صفر .
- ب) النشاط للأب فقط ( $t_{1/2} = \infty$ ) ، وهذا يساوي النشاط الكلي للبنت في العينة التي تحتوي على الأب والبنت .
- ج) التحلل الإشعاعي لعينة البنت المعزولة والنقية ( $t_{1/2} = 0.80$  ساعة) .
- د) نمو النشاط الإشعاعي للبنت من أب نقي .

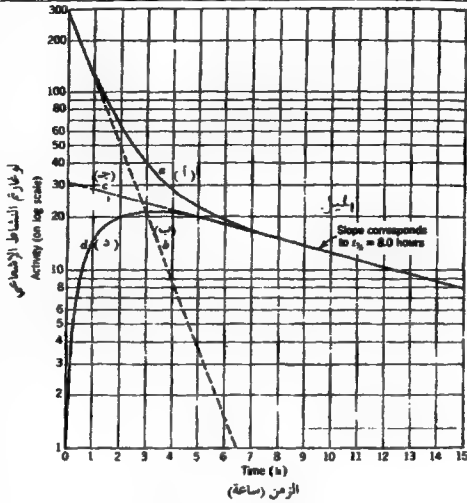
#### 4-4-4 حالة عدم الاتزان Case of No Equilibrium

إذا كانت فترة نصف العمر للأب أصغر بكثير من تلك للبنت ، فإننا لن نصل إلى اتزان عند أي زمن . وإذا تبعنا عينة من الأب نقيية كيميائياً ، لاحظنا نمو البنت بسرعة نتيجة لتحلل الأب السريع وبعد أن تصل كمية البنت إلى أقصى قيمة لها تبدأ بالتحلل من خلال فترة نصف العمر الخاصة بها . ويبين الشكل (4-4) هذه الحالة (  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 10$  و  $C_2 = C_1$  ) . يلاحظ من الشكل أن تحلل البنت الأسّي الأخير مرتبط بنصف عمر البنت وهو خط مستقيم امتداده إلى صفر  $t$  يساوي  $C_2 \lambda_2 N_1^0$  إذا كانت  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  . وتساوي  $N_1^0$  امتداد لقيمة  $N_2$  عند صفر  $t$  . فالنسبة بين النشاط الأولي  $C_1 \lambda_1 N_1^0$  و  $C_2 \lambda_2 N_1^0$  تساوي :

$$\frac{C_1 \lambda_1 N_1^0}{C_2 \lambda_2 N_1^0} = \frac{C_1}{C_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{C_1 t_{1/2}(2)}{C_2 t_{1/2}(1)} \quad (4-25)$$

وفي حال أن  $\lambda_2$  ليست عديدة القيمة بالمقارنة مع  $\lambda_1$  استبدلنا  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  بالنسبة

$$\frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2} \text{ مما سيؤثر على المقدار الذي يمثل علاقة أنصاف العمر مع بعضها البعض ليساوي } \frac{t_{1/2}(2) - t_{1/2}(1)}{t_{1/2}(1)}$$



شكل 4-4 : حالة عدم الاتزان

أ) النشاط الكلي .

ب) النشاط للأب فقط ( $t_{1/2} = 0.80$  ساعة) .

ج) امتداد منحنى التحلل الأخير (النهائي) إلى الزمن صفر .

د) النشاط للبنات في عينة الأب النقية كيميائياً عند الزمن صفر .

يمكن دراسة الاتزان العابر وحالة عدم الاتزان من خلال  $t_{max}$  ، وهي الفترة الزمنية اللازمة لوصول البنت إلى أعلى قيمة نشاط لها وذلك من نحوها من عينة أب نقية كيميائياً . وللحصول على  $t_{max}$  نفاضل المعادلة (4-18) بالنسبة للزمن كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (4-26)$$

وبالتعويض بـ  $t_{max}$  في مكان  $t$  عندما  $\frac{dN_2}{dt} = 0$  نحصل على :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_{max}} \quad (4-47)$$

$$t_{max} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad \text{أو}$$

أي أن سرعة تحلل البنت  $\lambda_2 N_2$  تساوي سرعة نحوها عند  $t_{max}$  (شكل 4-2 و 4-4) ، وأما في حالة الاتزان القرني فإن  $t_{max}$  تساوي مالا نهاية .

## 4-5 التحللات المتتالية Successive Decays

إذا أخذنا بعين الاعتبار سلسلة من ثلاث أو أكثر من النواتج المشعة ، وجب علينا إيجاد معادلة لـ  $N_3$  تختلف عن معادلة (4-4) لـ  $N_1$  ومعادلة (4-18) لـ  $N_2$  ، وهذه المعادلة تأتي من حل المعادلة التفاضلية التالية :

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (4-28)$$

وقد قام العالم هـ. باتن بحل هذه المعادلة بحيث تشمل  $n$  من أعضاء السلسلة. وافترض

أن قيمة صفر  $N_2^0 = N_3^0 = \dots = N_n^0 = 0$  عند  $t = 0$  . وحصل على الحل التالي :

$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad (4-29)$$



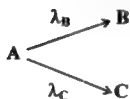
$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_1^0 \quad \text{حيث أن}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0 \quad \text{و}$$

وهكذا .

#### 4-6 التحلل المتفرع Branching Decay

وهي إمكانية تحلل النظير المشع بأكثر من طريقة .



$\lambda_B$  و  $\lambda_C$  هما ثابتا التحلل الجزئيين لكل من B و C .

ويتكون B بالسرعة التالية :

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_B N_A \quad (4-30)$$

أما A فيستهلك أو يتحلل بالسرعة التالية :

$$\frac{dN_A}{dt} = -(\lambda_B + \lambda_C) N_A \quad (4-31)$$

$$\frac{0.693}{\lambda_1} = t_{1/2}(A) \quad \text{وللتواة A فترة نصف عمر خاصة بها}$$

وتساوي  $\lambda_1 = \lambda_B + \lambda_C + \dots$  ، أي أن نصف العمر مرتبط  
 بسرعة التحلل الكلية بغض النظر عن ميكانيكية التحلل . وبحسب ثابت التحلل  
 الجزئي بضرب ثابت التحلل الكلي في نسبة ذلك التحلل ، فعلى سبيل المثال يتحلل

$^{64}\text{Cu}$  باقتصاص الإلكترون  $E.C$  ونسبته 43% ويطلق الإلكترون السالب ونسبته 38% ويطلق الإلكترون الموجب ونسبته 19% ، فإذا كان نصف العمر لـ  $^{64}\text{Cu}$  12.8 ساعة ، فإن ثابت التحلل الكلي  $\lambda_T = 0.0541 \text{ ساعة}^{-1}$  . وثابت التحلل الجزئية تساوي :

$$\lambda_{E.C} = 0.43 \times 0.0541 = 0.0233 \text{ ساعة}^{-1}$$

$$\lambda_{\beta^-} = 0.38 \times 0.0541 = 0.0206 \text{ ساعة}^{-1}$$

$$\lambda_{\beta^+} = 0.19 \times 0.0541 = 0.0103 \text{ ساعة}^{-1}$$

ومن قيم الثوابت الجزئية نحصل على قيم نصف العمر الجزئية التالية :

$$t_{1/2}(E.C) = 29.7 \text{ ساعة}$$

$$t_{1/2}(\beta^-) = 33.6 \text{ ساعة}$$

$$t_{1/2}(\beta^+) = 67.5 \text{ ساعة}$$

## 4-7 وحدات النشاط الإشعاعي

### Units of Radioactivity

تعرف كمية الإشعاعات المنطلقة من قبل أي مادة مشعة بنشاط تلك العينة  $A$  ، وهذا يساوي عدد حالات التحلل النووي أو الضربات النووية في الثانية الواحدة في العينة التي تخضع للدرس . وتعرف وحدة النشاط (بيكورييل ، بك) بأنها تحلل نووي في الثانية (حسب نظام الوحدات العالمي) .

$$1 \text{ بك (Bq)} = 1 \text{ تحلل/ثانية} .$$

أما الكوري (Ci) فيعرف بأنه عدد التحللات النووية في الثانية الناتجة عن غرام واحد من الراديوم . وقد وجد أنه يحدث في الغرام الواحد من الراديوم

$3.7 \times 10^{10}$  تحلل/ثانية ، أي أن الكوري =  $3.7 \times 10^{10}$  بك (Bq) .

فإذا أعطت أي كمية من عنصر مشع  $3.7 \times 10^{10}$  تحلل/ثانية ، قيل أن نشاط هذه العينة يساوي كوري واحد ويستخدم العلماء المليكوري (mci) والميكروكوري ( $\mu ci$ ) في القياس أيضاً .

وهناك طريقة أخرى لقياس النشاط ، وهي ما يعرف بالنشاط النوعي ، وهو يساوي عدد التحللات في الثانية الواحدة لكل غرام من العينة ، ووحدته بك/غم (Bq/gram) . وتسمى كمية الإشعاعات المتصصة من قبل جسم ما في مسار الإشعاع بالجرعة المتصصة أو بالجرعة Dose . وفي نظام الوحدات العالمي تعرف على أساس كمية الطاقة بالجول التي تمتص من قبل كل كغم من المادة ، ويرمز لها بالرمز Gy من Gray . وإذا امتص 1 غم من المادة 100 إرج من الطاقة سميت الوحدة بالراد Rad .

Gy واحد = 1 جول/كغم = 100 راد .

ولا تميز وحدة Gy بين تأثيرات الأنواع المختلفة من الإشعاعات في ما يخص تلف الأنسجة الحيوانية .

لإشعاعات ألفا وبيتا وغاما لها درجات امتصاص مختلفة من قبل الأنسجة ، ولهذا فإنها تخترق جسم الإنسان إلى أعماق مختلفة .

والوحدة التي تأخذ بعين الاعتبار نوع الإشعاع المتصص من قبل الأنسجة الحيوانية هي وحدة الريم (rem) ، وللحصول على الجرعة المتصصة بوحدة الريم تضرب الجرعة المتصصة بالراد بمعامل خاص يعتمد على نوع الإشعاع المتصص .

## الأسئلة :

- 1- لدى مستشفى ما 1.5 كوري من  $^{226}\text{Rn}$  على شكل  $\text{RaBr}_2$  المذاب في الماء ، فإذا كانوا يفصلون غاز  $^{222}\text{Rn}$  كل 48 ساعة ، فاحسب ما يلي :
  - أ) نشاط  $^{222}\text{Rn}$  في تلك اللحظة (بعد 48 ساعة) .
  - ب) حجم غاز  $^{222}\text{Rn}$  في الظروف المعيارية بعد 48 ساعة .
- 2- احسب :
  - أ) كتلة 1 كوري من  $^{222}\text{Rn}$  .
  - ب) كتلة 1 كوري من  $^{32}\text{P}$  .
  - ج) سرعة التحلل لـ 1 سم<sup>3</sup> من غاز  $^3\text{H}$  في الظروف المعيارية .
- 3- قام أحد العلماء بقياس النشاط الإشعاعي لعينة ما على فترات زمنية فحصل على ما يلي :

النشاط (تحلل/دقيقة)	الزمن (ساعة)
11100	0.3
5870	5
3240	10
2005	15
1440	20
1015	30
888	40
826	50
625	100

احسب نصف العمر لكل من المكونين ثم النشاط الإشعاعي لكل منهما عند الزمن صفر ، علماً بأن الإشعاع الخلفي هو 100376 تحلل في 1000 دقيقة وأن فعالية الكشف 17% .

4- وجد أن نشاط  $\alpha$  الإشعاعي لمخلوط من نظائر الأستاتين At عند فترات

زمنية هو :

النشاط (تحلل/دقيقة)	الزمن (دقيقة)
756	12
725	17.2
638	23.1
600	30.0
545	37.7
494	47.5
435	59.5
380	73
341	87
288	102
256	121
215.5	140
178.5	161
150.7	184
127.3	211
101.9	243

84.9	276
68.2	308
55.0	340

احسب فترة نصف العمر لكل من النظائر ونشاطها الإشعاعي عند الزمن صفر .  
 6- إذا افترضنا أن كمية  $^{238}\text{U}$  تساوي كمية  $^{235}\text{U}$  عند بداية الخلق ، وأن نسبة  $^{238}\text{U}$  إلى  $^{235}\text{U}$  هي 1:138 في وقتنا الحاضر . احسب العمر الزمني للخلق .  
 7- إذا كان النشاط النوعي للبتاسيوم 1850 تحلل في الدقيقة/غم K وأن للبتاسيوم نظير واحد مشع هو  $^{40}\text{K}$  وأن نسبته في الطبيعة هي 0.0119 % ، احسب نصف عمر  $^{40}\text{K}$  .

8- عينة من  $^{239}\text{Pu}$  النقي كتلتها 0.10 ملغرام ونشاطها  $1.38 \times 10^7$  تحلل في الدقيقة ، احسب نصف عمر  $^{239}\text{Pu}$  . وإذا علمت أن  $^{239}\text{Pu}$  يتكون من تحلل  $^{239}\text{Np}$  ، فما هو عدد الكوري من  $^{239}\text{Np}$  اللازمة لإنتاج 0.100 ملغرام  $^{239}\text{Pu}$  .  
 9- تم تحضير  $1.00 \times 10^{-10}$  غرام من  $^{210}\text{Bi}$  ، فإذا تركت هذه العينة بعد ذلك لمدة من الزمن بحيث وصلت كمية البنت  $^{210}\text{Po}$  إلى أقصى كمية لها فاحسب ما يلي :

( أ )  $t_{\max}$  .

( ب ) نشاط ألقا الإشعاعي لـ  $^{210}\text{Po}$  عند  $t_{\max}$  .

( ج ) نشاط بيتا الإشعاعي لـ  $^{210}\text{Bi}$  عند  $t_{\max}$  .

( د ) كتلة  $^{210}\text{Po}$  وكميته بالكوري عند  $t_{\max}$  .

10- تم قياس النشاط الإشعاعي لعينة نصف عمرها 7.5 دقيقة ما بين 10:03 و 10:13 فوجد أنه يساوي 34650 في العشر دقائق ، ما هو نشاط العينة بوحدة تحلل/دقيقة في الساعة 10:00 ؟ .

## الفصل الخامس

### تفاعلات الإشعاعات مع المادة

#### INTERACTION OF RADIATIONS WITH MATTER

##### 5-1 مقدمة

وجد العلماء أن الطريقة الوحيدة للكشف عن الإشعاعات النووية هي من خلال تفاعلها مع المادة . وأنه لمن الصعب الكشف عن الإشعاع إذا كان تفاعله مع المادة قليلاً كالنيوترون على سبيل المثال . ومن أجل أن نفهم طرق وأجهزة الكشف والقياس والتشخيص للإشعاعات النووية علينا أن ندرس تفاعل هذه الإشعاعات مع المادة .

ويساهم تباطء الإشعاع وامتصاصه في المادة في التقليل من طاقة الدقائق العالية وفي الكشف عن إشعاع معين من ضمن عدة إشعاعات لكل منهم خواص امتصاص خاصة به وفي استخدام الإشعاعات في الطب النووي .

اعتمد العلماء حتى عام 1950 على دراسة امتصاص الإشعاعات المنطلقة من مصادرها في تحديد طاقتها . وبعد ذلك استخدم الانحراف في المجال الكهربائي والمغناطيسي في تحديد الطاقة . تؤدي تفاعلات الإشعاعات جميعها مع المادة في نهاية الأمر إلى نفس النتيجة . وتضم المرحلة الأولى من التفاعل مع المادة ما يلي :

أ) تهيج الذرات والجزيئات .

ب) تأين الذرات والجزيئات .

ويعتمد هذا التأثير على نوع الإشعاع ، إن كان دقائق مشحونة أو إشعاعات كهرومغناطيسية أو نيوترونات . وتضم الدقائق المشحونة الإلكترونات والأيونات الموجبة الخفيفة ولكل منهما تفاعل خاص فيه وذلك بسبب الفرق الكبير في الكتلة بينهما . وسندرس كل منهما على حده .

## 5-2 الأيونات الموجبة Positive Ions

### 5-2-1 طرق فقدان الطاقة

#### Processes Responsible for Energy Loss

تخسر الأيونات الموجبة طاقتها بصفة رئيسية من تفاعلها مع الإلكترونات . ويؤدي هذا التفاعل إلى فصل الجزيئات أو إلى تهيجها أو إلى تأين الذرات والجزيئات . ونظراً لسهولة قياس التأين استخدم في عملية الكشف عن الأيونات الموجبة . وبما أن دقائق ألفا معروفة من المصادر المشعة ركز العلماء في دراساتهم عليها .

يمكن لعدد من دقائق ألفا لهم طاقة ابتدائية معروفة أن يفقدوا كل الطاقة في حجرة التأين وذلك لأن دقائق ألفا تخترق المادة لمسافة قصيرة نسبياً فتتقصر طاقتها إلى طاقة حرارية . ولهذا يمكن قياس التأين الكلي الناجم عن دقيقة ألفا . ولقد دلت التجارب على أن معدل الطاقة المستهلكة في تكوين زوج من الأيونات في الهواء يساوي  $35 \text{ eV}$  ، بينما الطاقة التي نحتاجها لتكوين زوج من الأيونات في الغازات الأخرى تتراوح من  $21.9 \text{ eV}$  في الزيتون إلى  $43 \text{ eV}$  في الهيليوم . ويعكس هذا المدى الزيادة في طاقة التأين الأولى من  $12.1 \text{ eV}$  للزيتون إلى  $25.4 \text{ eV}$  للهيليوم . وفي كل من الغازين يتساوى ذلك الجزء من الطاقة الكلية المستخدم في التأين . وتقلل درجات التحرر Degrees of freedom الموجودة في الجزيئات الغازية المكونة من ذرتين أو أكثر كمية الطاقة المستهلكة في التأين ، فعلى سبيل المثال نحتاج إلى  $39 \text{ eV}$  لتكوين زوج الأيونات في غاز الأمونيا  $\text{NH}_3$  ، علماً بأن طاقة التأين الأولى له  $10.8 \text{ eV}$  . ونحتاج إلى طاقة أقل مما ذكر لتكوين زوج الأيونات في أشباه الموصلات كالجرمانيوم الذي نحتاج له  $2.9 \text{ eV}$  ، علماً بأن الطاقة اللازمة لرفع إلكترون إلى حزمة التوصيل تساوي  $1 \text{ eV}$  . وتستخدم أشباه الموصلات في أجهزة الكشف عن الإشعاعات .



لا تعتمد الطاقة المستهلكة في تكوين زوج الأيونات على طاقة وطبيعة الإشعاع ، وقد ثبت هذا بالتجربة عند استخدام دقائق ألفا بطاقة تساوي عدة ملايين إلكترون فولت ، وبروتونات بطاقة  $340 \text{ MeV}$  ودقائق بيتا . ومن الطرق المستخدمة في قياس طاقة دقيقة مشحونة قياس عدد الأيونات الكلي كهربائياً الناتجة عن إيقافها في حجرة التأين المملوءة بالغاز أو في شبه موصل .

يلعب جزء كبير من طاقة الأيون الموجب على شكل طاقة حركية للإلكترونات المنطلقة من تأين الذرات أو الجزيئات نتيجة اصطدامها مع الأيون الموجب . وبالرجوع إلى قانون حفظ الزخم فإن أقصى سرعة للإلكترون المنطلق من اصطدام أيون موجب سرعته  $v$  مع المادة هي  $2v$  . فعلى سبيل المثال إذا اصطدمت دقيقة  $\alpha$  بطاقة  $6 \text{ MeV}$  نجم عن ذلك إلكترون بطاقة قصوى تساوي  $3 \text{ KeV}$  . وإن معدل الطاقة المنقولة من الأيونات الموجبة للإلكترونات عند مرورها بمادة يساوي  $100-200 \text{ eV}$  . وتسمى الإلكترونات المنطلقة من التأين بالإلكترونات الثانوية أو أشعة  $\delta$  لنا ، ولديها طاقة كافية لتأين ذرات أخرى . وفي الحقيقة هناك  $60-80\%$  من التأين الناجم من الأيونات الموجبة سببه التأين الثانوي **Secondary Ionization** وأن النسبة بين التأين الرئيسي إلى الثانوي غير معروفة بدقة .

إذا قلت سرعة الأيون إلى حد أصبحت منه قريبة من سرعة إلكترونات التكافؤ التابعة للذرات مادة التوقف بدعت ظاهرة جديدة تسمى بالتصادمات المرنة **Elastic Collisions** فيصطدم الأيون مع ذرات المادة بدل من أن يهيج إلكتروناتها . وتؤدي هذه التصادمات إلى ما يسمى بالإيقاف النووي **Nuclear Stopping** والذي يقارن بالإيقاف الإلكتروني **Electronic Stopping** السابق الذكر والذي يحدث على سرعات عالية . وإذا انخفضت سرعة الأيون وأصبحت قريبة من سرعة إلكتروناته الموجودة في مستوى الطاقة الرئيسي **K** بدأ هذا الأيون في القاط الإلكترونات من ذرات مادة التوقف فقل

شحته من  $Z$  إلى  $Z-1$  . وفي الغالب فإن الأيونات المارة عبر المادة تفقد إلكترونات الأفلاك التي لها سرعة في الفلك أقل من سرعة الأيون نفسه أي تتحرى .

ويمكن القول أن هناك ثلاث طرق يخسر فيها الأيون طاقته هي :

أ - إذا كانت سرعة الأيون عالية جداً فإنه يفقد جميع إلكتروناته ويخسر طاقته عبر التهيح الإلكتروني والتأين لمادة الإيقاف .

ب- وإذا بلغت سرعته سرعة الإلكترونات الموجودة في مستوى طاقته الرئيسي  $K$  بدأ الأيون بالتقاط الإلكترونات من مادة الإيقاف . ويستمر في خسارة طاقته إلكترونياً في الغالب .

ج- وإذا وصلت سرعته من سرعة إلكترونات التكافؤ التابعة لذرات مادة الإيقاف بدأ يخسر طاقته من خلال التصادمات المرنة مع ذرات مادة الإيقاف بغض النظر إذا كان لا يزال يحتفظ بشحنة عليه أم لا .

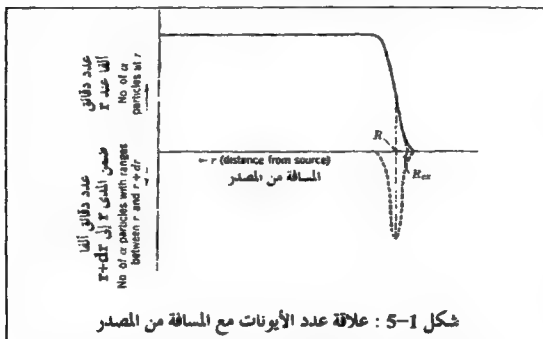
ويمكن القول أن ليس هناك تدرج واضح ما بين ب و ج . وإن هناك اصطدامات مرنة وغير مرنة يقوم بها الأيون في منطقة ما من الطاقة .

## 2-2-5 المدى Range

إذا قارنا كتلة الأيون الموجب مع كتلة الإلكترون وجدنا أن كتلته أضعافاً مضاعفة لكتلة الإلكترون . ولهذا فإن مسافة اختراق الأيونات الموجبة التي لها نفس النوع والطاقة الابتدائية متساوية في المادة تقريباً ، علماً بأن الأيون الموجب يصل إلى حالة السكون في نهاية المسافة . وتسمى هذه المسافة بالمدى ، ويعتمد المدى على نوع وطاقته الأيون . ويظهر تأثير الكتلة الكبيرة للحاسم في ما يلي :

(1) صغر كمية الطاقة المفقودة في كل اصطدام (أقصى طاقة مفقودة تساوي

من الطاقة الابتدائية ، حيث  $m$  كتلة الإلكترون و  $M$  كتلة الأيون الموجب).  
 فلهذا سيتعرض الأيون الموجب إلى عدد كبير جداً من الاصطدامات قبل أن يصل  
 إلى السكون ، أي أن التذبذب في معدل الطاقة المفقودة في كل اصطدام قليل جداً.  
 (2) انحراف الأيون الموجب عن مساره بعد كل اصطدام قليل جداً ، ولهذا  
 فإن طول المسار الفعلي قريب جداً من مسار إسقاطه الأولي .  
 ونظراً للتذبذب في معدل الطاقة المفقودة ومسار الإسقاط ظهر ما يسمى  
 بتفاوت المدى أو التفاوت Straggling علماً بأن نسبته قليلة .

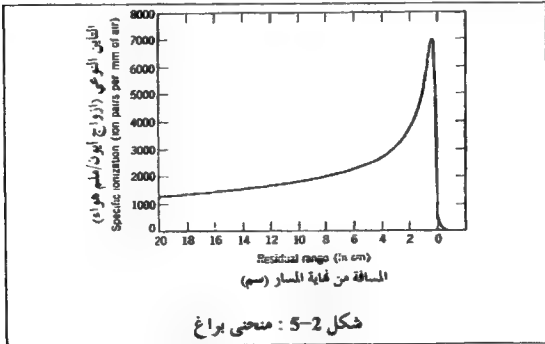


تحدد طرق الامتصاص مدى الأيونات الموجبة ، وذلك إما من خلال ماص صلب  
 أو غاز تحت ضغوط مختلفة . ويمثل الشكل (5-1) منحنى امتصاص محوره ص عبارة عن  
 عدد الأيونات الموجودة في الغاز على مسافة  $r$  من المصدر وأما محور ص فهو المسافة  $r$  من  
 المصدر المطلق للأيونات الموجبة ذات الطاقة الواحدة . ويتجم الجزء النقط في الشكل  
 (5-1) عن تفاضل الجزء المكمل للمنحنى ويمثل هذا تفاوت المدى أو التفاوت .

ومتوسط المدى  $R_m$  (mean range) للأيونات هو المسافة  $r$  إلى قمة منحنى التفاضل وأما المسافة  $r$  والتي نحصل عليها من امتداد الجزء المستقيم من المنحنى المكمل ونقاطه مع محور  $s$  فسمى بالمدى الممتد  $R_{\text{extrapolated range}}$  ويستخدم متوسط المدى في جداول المدى وفي العلاقات ما بين المدى والطاقة . ودرس العلماء العلاقة ما بين المدى الممتد ومتوسط المدى ، فهي تساوي 1.1٪ للدقائق ألفا ذات الطاقة العادية .

### 5-2-3 قدرة الإيقاف Stopping Power

تمثل العلاقة الرياضية  $dE/dx$  العلاقة بين طاقة الأيون الموجب ومداه . و  $dE/dx$  هي سرعة التناقص في الطاقة مع المسافة عبر المادة . وتسمى  $dE/dx$  أحياناً بقدرة الإيقاف أو التأين النوعي specific ionization ، وتعتمد  $dE/dx$  على طاقة وشحنة وكتلة الأيون .



ويوضح الشكل (5-2) الصفات العامة لقدرة الإيقاف ويسمى المنحنى

بمنحنى براغ Bragg Curve ، ويمثل الشكل (2-5) العلاقة ما بين التأين النوعي والمسافة للدقيقة ألفا من نهاية المسار . ويبين هذا الشكل أن أقصى سرعة خسارة أو تناقص للطاقة يحدث عندما تكون طاقة الدقائق قليلة والعكس صحيح ، أي أن  $dE/dx$  تتناسب عكسياً مع طاقة الدقيقة .

ويفسر هذا على أساس أن التفاعل ما بين الدقائق المشحونة والإلكترونات الذرية هو من النوع الكولومبي للإلكترونات التي يحدث بين الشحنات الموجبة والسالبة . فإذا قلت شحنة الأيون نتيجة اقتناصه للإلكترونات خلال مروره في المادة فإن التفاعل (أو التجاذب) الكولومبي وسرعة تناقص الطاقة سوف يقلان . وهذا ما يحدث بالفعل عندما تكون طاقة الدقائق المشحونة قليلة وتكون ميكانيكية فقدان الطاقة عبر التصادمات المرنة مع ذرات المادة . وبالرجوع إلى (ب ، 1-2-4) نرى أن الأيون الموجب سوف يلتقط ويخسر الإلكترونات عدة مرات بالقرب من نهاية المسار .

وتقل سرعة تناقص الطاقة عندما تكون طاقة الدقيقة المشحونة عالية ويفسر هذا على أساس زمن التفاعل Time of interaction ما بين الدقيقة المشحونة والإلكترونات الذرية ، فإذا كانت سرعة الأيون  $v$  فإن الزمن الذي سيقضيه الأيون بالقرب من الذرة يتناسب مع  $\frac{1}{v}$  . وبما أن انتقال الزخم يتناسب أيضاً مع  $\frac{1}{v}$  ، فإن انتقال الطاقة من الأيون إلى الإلكترون في الذرة يساوي النقص في طاقة الأيون ويتناسب طردياً مع مربع الزخم المفقود . ولهذا كان لا بُد من أن يكون هناك مقدراً في سرعة خسارة الطاقة يتناسب عكسياً مع  $v^2$  أو عكسياً مع  $E$  طاقة الدقيقة أو الأيون المشحون .

واشتق علماء كيمياء الكم والنسبية المعادلة التالية :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi\gamma^2 z^2 e^4 N Z}{mv^2} \left[ \ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (5-1)$$

حيث ان  $z$  العدد الذري للأيون و  $\gamma$  معامل التعري للأيون (معامل كسر الإلكترونات التي تم تعريضها من الأيون) و  $e$  شحنة الإلكترون و  $N$  عدد الذرات في وحدة الحجم لمادة الإيقاف و  $Z$  العدد الذري لمادة الإيقاف و  $m$  كتلة الإلكترون و  $v$  سرعة الأيون و  $I$  طاقة تأين الإلكترون في مادة الإيقاف. و  $\beta = \frac{v}{c}$  و  $c$  سرعة الضوء. وفي حال كانت طاقة الأيونات الحركية أقل من طاقة كتلتها الساكنة فإن قيمة  $\beta \ll 1$  وتختصر المعادلة (5-1) لتصبح كالآتي :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi\gamma^2 z^2 e^4 N Z}{mv^2} \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{2mv^2}{I} \quad (5-2)$$

وهذا يعني تناقص قدرة الإيقاف عندما تزداد سرعة الأيون . وفي حال أصبحت طاقة الأيون الحركية أعلى من طاقة كتلتها الساكنة اقربت قيمة  $\beta$  من 1 . وأما المقدار  $\lim(1-\beta^2)$  في المعادلة (5-1) فيتغير بسرعة ولهذا فإن قدرة الإيقاف تزداد مع ازدياد الطاقة . وأقل قيمة لها عندما تساوي الطاقة الحركية ضعف طاقة الكتلة الساكنة للأيون ، فهي في الكربون  $1.8 \text{ MeVg}^{-1} \text{ cm}^2$  وفي الرصاص  $1.1 \text{ MeVg}^{-1} \text{ cm}^2$  .

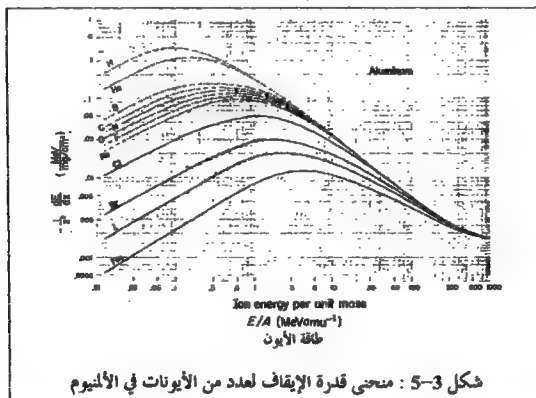
#### 5-2-4 قدرة الإيقاف لأيونات مختلفة في مواد مختلفة

##### Stopping Power for Different Ions in Different Materials

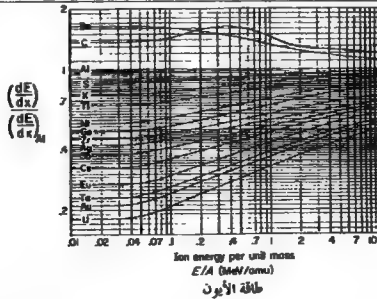
جاءت المعادلة (5-1) بالحقيقة المهمة التالية : قيمة  $-\frac{dE}{dx}$  لكل الأيونات المشحونة والتي لها نفس السرعة في مادة الإيقاف تتناسب طردياً مع مربع شحنتها. أي أن  $-\frac{dE}{dx}$  لبروتون  $P^+$  طاقته  $E$  ولديوترون  $D^+$  طاقته  $2E$  ولتريون  $T^+$  طاقته  $3E$  متساوية وتساوي  $\frac{1}{4}$  (ربع)  $-\frac{dE}{dx}$  لأيون هيليوم  $He^{2+}$  طاقته  $3E$  ولدقيقة ألفا

${}^4\text{He}^{2+}$  طاقتها  $4E$  . والشرطان الأساسيان لحلول ما سبق أن يعبرى أو يفقد الأيون جميع إلكتروناته ، أي أن قيمة  $\gamma = 1$  ، وأن لا يفقد طاقته عبر الاصطدامات المرنة أي الإيقاف النووي . وقد لوحظ أن الأيونات الخفيفة كالهيدروجين والهيليوم تعبرى من جميع إلكتروناتها إذا بلغت طاقتها  $1 \text{ MeV/amu}$  وحدة الكتلة الذرية) . بينما الأيونات الأثقل قليلاً من البورون إلى النيون فعبرى عند  $10 \text{ MeV/amu}$  . وفي حال اليورانيوم تصل إلى عدة مئات من  $\text{MeV/amu}$  .

وبين الشكل (3-5) ما يعقب ذلك من النقاط إلكترونات ومن الإيقاف النووي كلما قلت طاقة الأيون . ويمثل محور ص في الشكل (3-5) لوغاريتم قدرة الإيقاف في الألمنيوم مقسومة على مربع العدد الذري للأيون ويمثل محور س طاقة الأيون بوحدة  $\text{MeV/amu}$  لعدد من الأيونات .



ونرى من الشكل (5-3) والمعادلة (5-2) أن سرعة فقدان الطاقة  $-\frac{dE}{dx}$  لأيونات مختلفة لها نفس الطاقة غير متساوية . فعلى سبيل المثال إذا كان هناك الأيونات التالية  $^{14}\text{N}$  و  $^{16}\text{O}$  و  $^{18}\text{O}$  ولكل منها طاقة 80 MeV فإن  $-\frac{dE}{dx}$  لها في الألمنيوم 3.46 و 3.32 و 2.49  $\text{MeVmg}^{-1} \text{cm}^2$  . تعطي المعادلتان (5-1) و (5-2) قدرة الإيقاف  $-\frac{dE}{dx}$  بوحدة  $\text{erg/cm}$  ، وإذا أردنا تحويلها إلى الوحدة  $\text{MeVmg}^{-1} \text{cm}^2$  وجب علينا قسمتها على  $1.6 \times 10^{-6} \text{ ergMeV}^{-1}$  وعلى كثافة مادة الإيقاف بوحدة  $\text{mg cm}^{-3}$  . وتستخدم خاصية قدرة الإيقاف في التعرف على الأيونات التي لها عدد ذري لا يزيد عن 25 وعلى نظائر الأيونات التي لها عدد ذري يقل عن 21 وذلك من خلال الجهاز المسمى بالـ *Particle-identifier telescope* . وطريقة عمل هذا الجهاز فهي كالآتي: تمر الدققة أولاً عبر كاشف رقيق حيث تفقد جزء من طاقتها ومن ثم عبر كاشف سميك حيث تفقد كل طاقتها . وتحدد الطاقة الدققة من مجموع الإشارتين و  $-\frac{dE}{dx}$  من الإشارة الخاصة بالكاشف الرقيق . وهذا يؤدي إلى تشخيص الدققة وإلى قياس طاقتها .



شكل 4-5 : قدرة الإيقاف لأيون ما في ماصات صلبة مختلفة بالنسبة للألمنيوم



يبين الشكل (4-5) قدرة الإيقاف لأيون ما في مواد ماصة صلبة مختلفة نسبة للألنيوم . يستخدم هذا الشكل مع الشكل (3-5) في تحديد قدرة الإيقاف لأيونات معددة في مواد ماصة صلبة مختلفة . ومثال على ذلك قدرة الإيقاف لأيون  $^{12}\text{C}$  طاقته 120 MeV في النيكل تساوي  $1.0 \text{ MeVmg}^{-1}\text{cm}^2$  ، وهذه القيمة قد حُسبت كالآتي :  
 أ ) قدرة الإيقاف لأيون  $^{12}\text{C}$  طاقته 120 MeV في الألنيوم من الشكل (3-5) تساوي  $1.2 \text{ MeVmg}^{-1}\text{cm}^2$  ، كما يلي :

$$0.033 = -\frac{1}{Z^2} \frac{dE}{dx} \quad \text{وبالمقابل فإن} \quad 10 \text{ MeV/amu} = 120/12 = E/A$$

$$1.2 \text{ MeVmg}^{-1}\text{cm}^2 = (6)^2 \times 0.033 = -\frac{dE}{dx} \quad \text{وقدرة الإيقاف}$$

ب) قدرة الإيقاف لأيون طاقته 10 MeV/amu في النيكل نسبة للألنيوم من الشكل (4-5) هي 0.84 .

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ni}}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}}} = 0.84 \quad \text{أي أن}$$

وبالتعويض من ( أ ) بقيمة  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}}$  فإن :

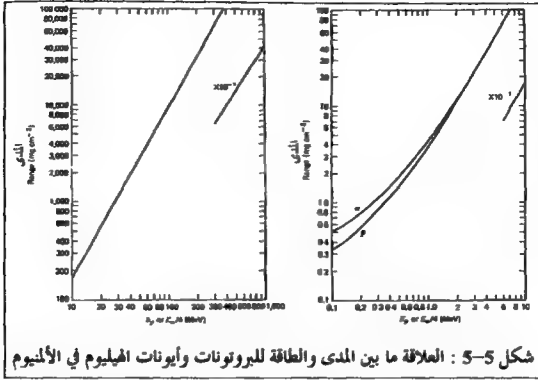
$$1.0 \text{ MeVmg}^{-1}\text{cm}^2 = 1.2 \text{ MeVmg}^{-1}\text{cm}^2 \times 0.84 = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ni}}$$

## 5-2-5 العلاقات ما بين الطاقة والمدى

### Range-Energy Relations

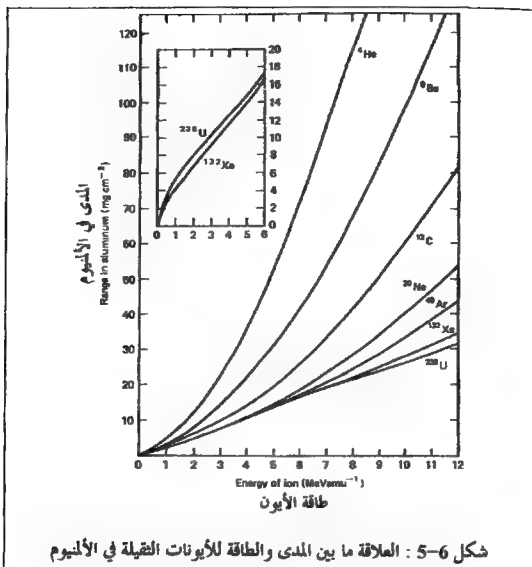
يمكننا أن نحسب المدى لأيون من تكامل مصطلح أو مقدار الطاقة المفقودة :

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{1}{dE/dx} dE \quad (5-3)$$



شكل 5-5 : العلاقة ما بين المدى والطاقة للبروتونات وأيونات الهيليوم في الألمنيوم

يمثل الشكل (5-5) العلاقة بين المدى للبروتونات ولدقائق ألفا (أيونات الهيليوم) في الألمنيوم والطاقة الحركية لكل منهما . بينت هذه المنحنيات على الحسابات النظرية وليست العملية وذلك لأنها أدق . ولقد استخدمت المعادلة (1-5) في الحسابات النظرية لتغطية ذلك المدى من الطاقة ، وذلك لظهور طرق أخرى لحسارة الطاقة عندما تكون طاقة الأيون عالية جداً ، فعلى سبيل المثال : تخسر البروتونات ذات 2GeV 15% من طاقتها نتيجة للتفاعلات النووية في ماص من الرصاص سمكه 2.5م وحوالي 3% نتيجة لتفاعلات التأين في الرصاص . أما الشكل (5-6) فيبين علاقة المدى مع الطاقة لعدد من الأيونات الأخرى . أما إذا استخدمنا المعادلة (5-2) في المعادلة (5-3) لحساب المدى وأهمنا المقدار  $\lim_{I \rightarrow 0} \frac{2mv^2}{I}$  ، نجد أن المدى للدقيقة يتناسب طردياً مع مربع طاقتها غير النسبية .



وبناء على هذا حاول العلماء اشتقاق المعادلة الشبه تجريبية للعلاقة ما بين الطاقة والمدى التالية :

$$R = aE_0^b \quad (5-4)$$

وتحسب قيم الثابت  $a$  و  $b$  عملياً وذلك لأنها تتغير تغيراً طفيفاً مع الطاقة . أما  $E_0$  فهي الطاقة الحركية للأيون الموجب .

تعتمد قيم  $a$  و  $b$  على نوع الدققة ، وتراوح قيم  $b$  من 1.7 إلى 1.8

للأيونات التي تصدر تماماً من إلكتروناتها طوال المدى . أما الأيونات الناجمة عن الانشطار والتي لها  $\gamma < 1$  ، فإن مداها يزداد قليلاً مع الطاقة ، وذلك لأن زيادة الطاقة سيؤدي إلى زيادة معدل الشحنة على الأيون ، ولهذا فإن قيمة  $b$  تساوي 0.5 ومداها يتناسب طردياً مع سرعتها . تستخدم المعادلة (4-5) في الاستكمال الداخلي interpolation والاستكمال الخارجي extrapolation لجداول المدى . وبما أن قدرة الإيقاف الإلكتروني لكل الأيونات التي تسير بنفس السرعة تتناسب طردياً مع مربع شحنة الأيون استطعنا أن نعبّر عن المدى لأيون ما نسبة لأيون آخر بطريقة بسيطة ، على شرط أن يقضيا كل وقته في مادة الإيقاف (المدى) متعبرين من الإلكترونات ، من خلال المعادلة التالية :

$$R(Z_1, M_1, E_1) = \frac{M_1 Z_1^2}{M_2 Z_2^2} R\left(Z_2, M_2, \frac{M_2}{M_1} E_1\right) \quad (5-6)$$

حيث أن  $E_1, M_1, Z_1$  عبارة عن العدد الذري والكتلة والطاقة لذلك الأيون . فعلى سبيل المثال : ما هو المدى لأيون  $^{16}\text{O}$  طاقته 160 MeV . في الألمنيوم ؟ للإجابة على هذا نجد من الشكل (5-5) أن المدى لبروتون طاقته 10 MeV هو  $171 \text{ mg cm}^{-2}$  ، وبالتعويض في المعادلة (5-6) نحصل على ما يلي :

$$\begin{aligned} R(8, 16, 160) &= \left( \frac{16 \times 1^2}{1 \times 8^2} \right) R\left(1, 1, \frac{1}{16} \cdot 160\right) \\ &= \left( \frac{16}{64} \right) 171 = 43 \text{ mg cm}^{-2} \end{aligned}$$

وإذا قارنا هذه القيمة المحسوبة مع تلك المقاسة  $46.8 \text{ mg cm}^{-2}$  نقول أن المدى الفعلي أكبر قليلاً وذلك لأن اقتصاص الإلكترونات يقلل من سرعة فقدان الطاقة ، والخطأ في القيمة المحسوبة ناجم عن ذلك الجزء من المدى الذي لا يكون فيه الأيون متأيئاً تماماً .

تتكون مادة الإيقاف من عنصر أو أكثر . وفي حال كان هناك مركب أو مخلوط من العناصر مثل الهواء على سبيل المثال ، فإن قدرة الإيقاف الكلية هي مجموع قدرة الإيقاف لكل من المكونات . ونعبر عن هذا بالمعادلة التالية :

$$\frac{1}{R_t} = \frac{W_1}{R_1} + \frac{W_2}{R_2} + \frac{W_3}{R_3} + \dots \quad (5-7)$$

حيث أن  $R_1, R_2, R_3, \dots$  قيم المدى بوحدة  $\text{mg/cm}^2$  لذلك الأيون في كل من المكونات 1 و 2 و 3 ... و  $R_t$  هو مدى ذلك الأيون في المركب أو المخلوط المتجانس من العناصر المختلفة كل حسب كسر وزنه  $W_1, W_2, W_3$  . ولا تستخدم المعادلة (5-7) للمخاليط غير المتجانسة .

## 5-2-6 التفاوت Straggling

وجد العلماء أن هناك تذبذب في كمية الطاقة المفقودة في كل اصطدام وفي عدد الاصطدامات التي تحدث في وحدة المسار الطولية . ويزداد التذبذب في الطاقة المفقودة في كل اصطدام كلما قلت طاقة الأيون والتي يصاحبها تذبذب في شحنة الأيون إلى أن تقل الطاقة ويصبح الإيقاف النووي المهيمن . ونتيجة للإيقاف النووي يحدث تشتت في مسار الأيون بما يعني أن مسار الحركة الفعلي للأيون أقل من المسار القطعي المتوقع . ونتيجة لهذه التأثيرات فإنه لن يكون هناك مدى وحيداً للدقائق حزمة من الأيونات لها نفس الطاقة في ماص ما . أي أن هناك انتشاراً في المدى أو ما يسمى بالتفاوت في المدى .

ويعرف التفاوت S كميّاً على أنه الفرق بين متوسط المدى والمدى الممتد (شكل 1-5) . فعلى سبيل المثال فإن التفاوت لبروتونات تسير في الهواء يتراوح من 1.9 إلى 1.1٪ من متوسط المدى إذا تراوحت الطاقة الأولية من 8 إلى 500 MeV ،

وتقل نسبة التفاوت بحوالي 0.3 كلما ازدادت طاقة الأيون أربع أضعاف . ويمكننا أن نحسب التفاوت لأي دقيقة لها شحنة  $Z$  وكتلة  $M$  بالرجوع إلى تفاوت البروتون الذي له نفس السرعة الأولية وطاقته عالية بحيث تكون شحنته  $+1$  في معظم المدى وذلك باستخدام المعادلة (5-8) التالية :

$$S_{Z,M} = \frac{\sqrt{M}}{Z^2} S_{1,1} \quad (5-8)$$

ويستفاد من هذه المعادلة في حساب التفاوت لدقائق ألفا التي لها 40 MeV ولكنها لا تصلح لنواتج الانشطار .

### 5-3 إلكترونات Electrons

#### 5-3-1 طرق فقدان الطاقة

#### Processes Responsible for Energy Loss

تفاعل الإلكترونات مع المادة بطريقة مشابهة للأيونات الموجبة . كما يتم فقدان الطاقة بنفس الطريقة في كلا الحالتين . وإن معدل الطاقة المستهلكة المفقودة في تكوين زوج من الأيونات في الهواء يساوي 35 eV وهي نفس القيمة في حال الأيونات الموجبة (1-2-4) . ويقدر التأين الرئيسي الناجم عن التأين بالإلكترونات بحوالي 20-30٪ من التأين الكلي ، أي أن التأين الثانوي يشكل ما نسبته 70-80٪ من التأين الكلي .

وجد العلماء أن هناك بعض الاختلافات بين تفاعلات الإلكترونات والأيونات الموجبة مع المادة . أولها سرعة الإلكترون التي تفوق بكمية كبيرة سرعة الأيون الموجب ولهذا فإن التأين النوعي للإلكترون أقل بكثير . وبين الجدول (5-1) التأين النوعي للإلكترونات في الهواء عند قيم طاقة متعددة . ويلاحظ من الجدول السابق أن أعلى قيمة تأين نوعي 5950

زوج من الأيونات لكل ملغرام لكل مستقيم مربع تحدث عندما تكون طاقة الإلكترون 146 eV وسرعته 0.024 C (سرعة الضوء). وهذه السرعة أعلى من سرعة دقائق ألفا عند قمة منحى براغ. ويعوق التأين في الهواء إذا وصلت طاقة الإلكترون إلى 12.5 eV (طاقة التأين الأولى لجزيء الأوكسجين). ثم تصل كمية التأين النوعي إلى أقل قيمة لها عندما تصل طاقة الإلكترون إلى 1.4 MeV. وإذا ازدادت الطاقة عن ذلك فسرت الزيادة في التأين النوعي على أساس التأثير النسبي المستمد من المعادلة (5-1).

السرعة Velocity (in Units of the Velocity of Light, c)	الطاقة Energy (MeV)	أزواج الأيونات Ion Pairs per 1.00 mg cm <sup>-2</sup>
0.001979	10 <sup>-6</sup>	0
0.006257	10 <sup>-5</sup>	0
0.0240	1.46×10 <sup>-4</sup>	5950 (maximum)
0.1950	10 <sup>-2</sup>	~850
0.4127	0.05	154
0.5483	0.10	116
0.8629	0.50	50
0.9068	0.70	47
0.9411	1.0	46
0.9791	2.0	46
0.9893	3.0	47
0.9934	4.0	48
0.9957	5.0	49
0.9988	10	53
0.99969	20	57
0.999949	50	63
0.9999871	100	66

جدول 5-1 : التأين النوعي للإلكترونات ذات الطاقة المختلفة في الهواء .

قد يخسر الإلكترون كل طاقته في اصطدام واحد ولهذا فإن التفاوت في المدى أعلى من الأيونات الموجبة ولا تغطي المعادلة الرياضية الوصف الحقيقي لعملية فقدان الطاقة . فإذا مرت حزمة متجانسة من الإلكترونات في المادة ازداد التفاوت نتيجة لتشتت الإلكترونات في جميع الاتجاهات مما سيؤدي إلى وجود أطوال مختلفة للمدى في مادة الامتصاص . ويتبع الانحراف الزاوي الكبير للإلكترونات عن التشتت النووي على الرغم من أن فقدان الطاقة ناجم عن التفاعل مع الإلكترونات .

تفقد الإلكترونات ذات الطاقة العالية طاقتها بطريقة أخرى أيضاً وتسمى هذه الطريقة بإطلاق الإشعاع (برمز إشعاع ألونج *bremstrahlung*) ، وتحدث عندما يتسارع الإلكترون في المجال الكهربائي للنواة . وتقدر نسبة فقدان الطاقة بهذه الطريقة إلى تلك التي تتم بالتأين في عنصر ما عدده الذري  $Z$  بالمقدار التالي  $\frac{EZ}{800}$  ، و  $E$  هي طاقة الإلكترون بوحدة المليون إلكترون فولت . وهذا يعني أن فقدان الطاقة بهذه الطريقة يصبح محسوماً في  $Pb$  الرصاص عند  $E = 1 \text{ MeV}$  وغير مهم في المواد الخفيفة كالهواء والألنيوم عندما تكون طاقة الإلكترون تساوي طاقة بيتا . وتعرف المسافة التي تقص من خلالها طاقة الإلكترون بمقدار  $e$  بطول الإشعاع (*Radiation Length*) .

وبما أن دقائق بيتا تنطلق بطيف من الطاقة المستمر فإن أي محاولة لتحليل امتصاصها في المادة فاشلة وذلك للتفاوت الكبير في المدى .

## 2-3-5 امتصاص دقائق بيتا

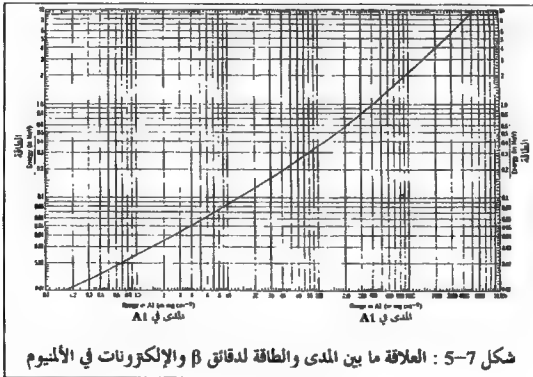
### Absorption of Beta Particles

يؤثر الطيف المستمر والتشتت لدقائق بيتا على امتصاصها مما يؤدي إلى أن هناك قانون أسي لامتصاص دقائق بيتا ذات الطاقة القصوى ، ولهذا ترمم منحنيات الامتصاص (النشاط ضد السمك للماص) على ورق نصف لوغاريتمي . ويعتمد



شكل منحنى الامتصاص على شكل طيف أشعة بيتا وعلى تأثير تشتتها وعلى الترتيب الهندسي للبيئة المشعة والماس والكاشف فعلى سبيل المثال إذا كانت البيئة والماس قريبين جداً من الكاشف ظهر منحنى الامتصاص وكأنه خط مستقيم وإذا كانت دقات بيتا نابعة عن طيفين مختلفين في الطاقة القصوى لذلك المصدر المشع فإن ميل المنحنى سيتغير ، وهذا يشبه إلى شكل كبير منحنى التحلل النصف لوغاريتمي لعينة تحتوي على مصدرين مشعين مختلفين في نصف العمر . وإذا عُرف المدى لدقائق بيتا ولإلكترونات التحول تمكنا من وضع علاقة بين المدى والطاقة يستفاد منها في معرفة الطاقة القصوى .

ومثل الشكل (5-7) العلاقة بين الطاقة والمدى .



### 3-3-5 التشتت المرتد Back Scattering

تلاحظ ظاهرة تشتت الإلكترونات بواسطة النواة والإلكترونات بشكل كبير وواضح أكثر من تشتت الدقائق الثقيلة . يتعكس أو يرتد جزء من الإلكترونات المصطدمة بمادة الماص نتيجة تشتت واحد أو تشتتات متعددة . وتزداد شدة الإلكترونات المرتدة كلما ازداد سمك العاكس إلى أن يصل السمك إلى أكثر من ثلث المدى للإلكترونات وتسمى هذه الحالة بالإشباع . وتسمى النسبة ما بين النشاط الإشعاعي لمصدر يطلق بيتا بوجود عاكس إلى تلك في عدم وجوده بمعامل التشتت المرتد . ولا يحمد معامل التشتت المرتد عند الإشباع على طاقة بيتا القصوى إذا تعدت  $0.6 \text{ MeV}$  ويتراوح المعامل من 1.3 للأنيوم إلى 1.8 للرصاص . وتعتمد هذه المعاملات على الترتيب الهندسي لعملية العد للدقائق اعتماداً مباشراً ، تغير بتغيره . ويمكن أن نجد أيضاً اختلافاً في التشتت المرتد للبروتونات والنيوترونات عند نفس الطاقة .

### 3-4-5 الإشعاع الكهرمغناطيسي

#### Electromagnetic Radiation

#### أشعة جاما وإكس Gamma and X-ray

#### 3-4-5 طرق فقدان الطاقة

#### Processes Responsible for Energy Loss

إذا مرت الفوتونات في المادة فإنها لا تخسر طاقتها بشكل مستمر في مسارها كما يحدث للدقائق المشحونة . فهناك طريقتين من ثلاثة طرق تتم فيها خسارة طاقة الفوتون الكاملة وانتقالها إلى مادة الماص من خلال تفاعل واحد . ولهذا فإن امتصاص الفوتونات في المادة يتبع النمط الأسّي ونصف السمك للفوتونات أكبر من المدى

لنناقش بيتا التي لها نفس الطاقة . وبناء على ما سبق فإن معدل التأين النوعي لأشعة جاما يساوي 0.1 إلى 0.001 من التأين النوعي للإلكترونات لها نفس الطاقة وإن المدى الحقيقي أكبر بكثير . وأما التأين الملاحظ في أشعة جاما فطبيعته في الغالب ثانوية . ومعدل الطاقة المستهلكة المفقودة في تكوين زوج من الأيونات في الهواء يساوي 35 eV وهي نفس القيمة في حال دقائق بيتا والأيونات الموجبة (1-3-4) .

## 2-4-5 الأثر الكهروضوئي Photoelectric Effect

إذا كانت طاقة الإشعاع الكهرومغناطيسي قليلة ، فإن أهم طريقة هي الأثر الكهروضوئي . والذي تنتقل فيه طاقة الإشعاع الكهرومغناطيسي  $h\nu$  إلى إلكترون مرتبط في الذرة أو الجزيء وينتج عن ذلك انطلاق الإلكترون بطاقة حركية تساوي  $\epsilon b - h\nu$  ، و  $\epsilon b$  هي طاقة ربط الإلكترون ، أي أن الإشعاع الكهرومغناطيسي يخفي تماماً ، كما يحافظ على الزخم في حال اكتسبت الذرة أو الجزيء المتبقي بعض الزخم . فإذا كانت طاقة الفوتون أعلى من طاقة الربط للإلكترونات مستوى K الرئيسي في الماص ، حدث الأثر الكهروضوئي في المستوى K بشكل كبير أو رئيسي وفي المستوى الرئيسي L بمحدود 20٪ ونقل النسبة في المستويات الخارجية . ولهذا السبب فإن احتمالية الامتصاص الكهروضوئي تتوقف تماماً عندما تساوي قيم طاقة جاما أو إكس طاقة ربط الإلكترونات في المستويات الرئيسية K, L, M, ..... إلخ .

فإذا كانت طاقة الفوتون أعلى من طاقة الربط للمستوى K في الماص فإن الامتصاص الكهروضوئي يقل بسرعة كبيرة (تقريباً مع  $E\gamma^{-7/2}$ ) ، ومن ثم يبطئ (تقريباً مع  $E\gamma^{-1}$ ) كلما ازدادت طاقة الفوتون . ويتناسب الامتصاص الكهروضوئي طردياً مع  $Z^5$  . وتصل نسبة الامتصاص الكهروضوئي إلى الامتصاص الكلي 5٪

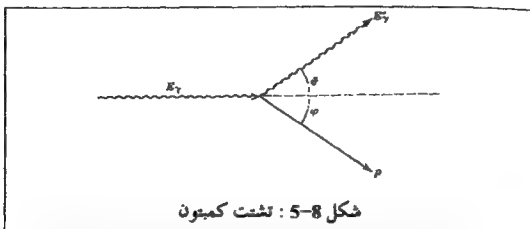
عندما تساوي طاقة جاما  $0.15 \text{ MeV}$  في الألمنيوم و  $0.40 \text{ MeV}$  في النحاس و  $1.2 \text{ MeV}$  في القصدير و  $4.7 \text{ MeV}$  في الرصاص . وليس للامتصاص الكهروضوئي أهمية تذكر في العناصر الثقيلة وذلك إذا كانت قيم الطاقة أكثر من  $1 \text{ MeV}$  . ويعزى التأين الناجم عن الإلكترونات الضوئية إلى الفوتونات ذات الطاقة القليلة والأثر التأيني الناجم عنها . ولهذا يستخدم الأثر الكهروضوئي في تحديد طاقة أشعة جاما وذلك من خلال قياس التأين الكلي الناتج عن الإلكترونات الضوئية بواسطة عدادات الوميض أو أشباه الموصلات .

### 3-4-5 أثر كمبتون Compton effect

يختلف هذا الأثر عن الأثر الكهروضوئي في أن جزء من طاقة الفوتون وليس كلها تنقل إلى إلكترون مرتبط أو حر غير مرتبط . وينتج عن ذلك نقصان في طاقة الفوتون وانحراف عن مساره الأصلي . ولهذا سماه بعض العلماء بتشتت كمبتون Compton Scattering . ومن ثم اشتقوا العلاقة الرياضية بين زاوية التشتت والطاقة المفقودة من الظروف النسبية في المحافظة على الزخم والطاقة . ويربط التعبير النسبي التالي العلاقة ما بين الطاقة الكلية  $E$  للدقيقة وزخمها .

$$E = (E_0^2 + C^2 P^2)^{1/2} \quad (5-9)$$

حيث أن  $E_0$  الطاقة الكلية للدقيقة في حالة السكون وتساوي  $mC^2$  و  $m$  هي كتلة الدقيقة في حالة السكون . كما علينا أن نذكر أن الكتلة الساكنة للفوتون تساوي صفراً . ويمثل الشكل (5-8) ما يحدث من تشتت وفقدان في الطاقة .



وتعرف  $E_\gamma$  على أنها طاقة أشعة جاما الأولية و  $E_\gamma^-$  على أنها طاقة جاما بعد الانحراف بزاوية  $\theta$  و  $E_0$  على أنها طاقة الإلكترون الساكن (511 KeV) و  $P$  على أنه زخم الإلكترون المنطلق بزاوية  $\phi$  بالنسبة للمسار الأصلي لجاما .  
وإن معاملات الظروف النسبية في المحافظة على الزخم والطاقة الموازية والمتعامدة مع مسار السقوط لجاما هي :

$$E_\gamma + E_0 = E_\gamma^- + (E_0^2 + C^2 P^2)^{1/2} \quad (5-10)$$

$$\frac{E_\gamma}{C} = \frac{E_\gamma^-}{C} \cos \theta + p \cos \phi \quad (5-11)$$

$$\frac{E_\gamma^-}{C} \sin \theta = p \sin \phi \quad (5-12)$$

وإذا ربعتنا المعادلتين (5-11) و (5-12) وعوضنا بالعلاقة  $1 = \sin^2 \phi + \cos^2 \phi$  حصلنا على ما يلي :

$$E_\gamma^2 - 2E_\gamma E_\gamma^- \cos \theta + (E_\gamma^-)^2 = C^2 P^2 \quad (5-13)$$

وإذا عوضنا المعادلة (5-13) في المعادلة (5-10) نتجت المعادلة (5-14) .

$$\frac{1}{E_\gamma^-} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1 - \cos \theta}{E_0} \quad (5-14)$$

وبالتعويض عن  $E$  بالقيمة  $\frac{hc}{\lambda}$  نحصل على ما يلي :

$$\lambda^- - \lambda = \frac{h}{m_e C} (1 - \cos\theta) \quad (5-15)$$

حيث أن  $m_e$  هي كتلة الإلكترون الساكن .

وتسمى  $\frac{h}{m_e C} = 2.42631 \times 10^{-10}$  سم بطول موجة كمبتون لذلك الإلكترون.

تبين معادلة (5-15) للطاقة الساقطة وجود حد أدنى لطاقة (حد أقصى لطول موجة) أشعة جاما المشتتة وهذا يحدث عندما تشتت في الاتجاه المعاكس  $\cos\theta = -1$  . وبحسب الحد الأدنى للطاقة مباشرة من المعادلة التالية :

$$(E_\gamma^-)_{\text{min}} = \frac{E_0}{2} \left( \frac{1}{1 + E_0/2E_\gamma} \right) \quad (5-16)$$

وإذا كانت طاقة أشعة جاما الساقطة  $E_0 \ll \frac{1}{2} E_0$  فإن الحد الأدنى لطاقة أشعة جاما المشتتة يساوي  $\frac{1}{2} E_0 = 250 \text{ KeV}$  . ولهذا يبين طيف الوميض لأشعة جاما ذات الطاقة العالية قمة تسمى قمة التشتت المرتد **back-scattering peak** عند طاقة  $250 \text{ KeV} \geq$  وتتجم هذه القمة عن تشتت كمبتون في المواد المحيطة . وبين الطيف وجود منخفض بين القمة الضوئية وطيف كمبتون المتصل ويساوي عرض هذا المنخفض الحد الأدنى لطاقة ( $250 \text{ KeV} \geq$ ) أشعة جاما المشتتة في البلورة . لا يعتمد تشتت كمبتون لكل إلكترون على العدد الذري  $Z$  ولهذا فإن معامل التشتت لكل ذرة يتناسب طردياً مع العدد الذري  $Z$  ، وفي حال تعدت الطاقة  $0.5 \text{ MeV}$  فإنه يتناسب طردياً مع  $E_\gamma^{-1}$  . أي أن هناك نقص تدريجي لتشتت كمبتون مع الزيادة في الطاقة وذلك إذا قورن مع الامتصاص الكهروضوئي وخاصة في مدى الطاقة الذي يصل إلى 1 أو 2 MeV ، ويسيطر تشتت كمبتون في الرصاص في مدى الطاقة من 0.6 إلى 4 MeV .

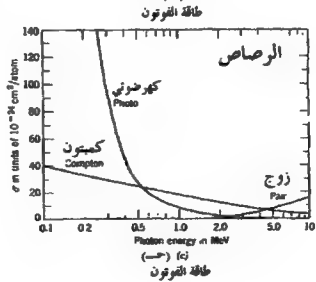
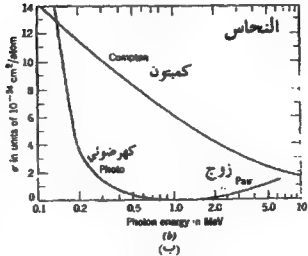
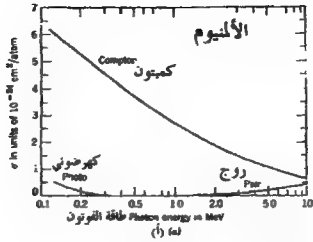
## 5-4-5 إنتاج الزوج Pair Production

يعرف إنتاج الزوج على أنه إنتاج لزوج من الإلكترون والبيزوترون وينظر إلى عملية إنتاج الأزواج على أنها الآلية الثالثة التي يخصص فيها الإشعاع الكهرومغناطيسي . لا يمكن أن تتحلل الأزواج إذا كانت طاقة  $E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$  . وإذا وصلت  $E_\gamma$  هذه القيمة ازدادت احتمالية حدوث إنتاج الأزواج ببطء مع الزيادة في الطاقة إلى أن تصل  $E_\gamma$  إلى حوالي  $4 \text{ MeV}$  ، عند ذلك تصبح العلاقة طردية مع  $\log E_\gamma$  . وتتناسب الاحتمالية طردياً مع  $Z^2$  . ويعبر إنتاج الأزواج الآلية المسيطرة عند قيم الطاقة العالية . وتحدد طاقة أشعة جيتا من خلال قياس الطاقة الكلية لأزواج الإلكترون - البيزوترون . ويضع إنتاج الأزواج عملية تسمى بإبادة البيزوترون **Positron Annihilation** يبد فيها الإلكترون السالب البيزوترون الموجب وينطلق عن ذلك فوتونات لكل منهما طاقة تساوي  $0.51 \text{ MeV}$  . ويستدل على إنتاج الأزواج من خلال طيف الأشعة الصادر عن الفوتونين عند  $0.51 \text{ MeV}$  .

## 5-4-6 الطاقة وتبعية العدد الذري

### Energy and Z Dependence

وجد العلماء أن المقاطع المعرضة للنرية الثلاثة والخاصة بطرق فقدان الطاقة الثلاث السابقة الذكر تزداد مع الزيادة في العدد الذري ويشذ عن هذا الأمر الكهروضوئي في حال كانت طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية قليلة جداً . ولهذا فإن للعناصر الثقيلة فاعلية أكبر في امتصاص الأشعة الكهرومغناطيسية بالمقارنة مع العناصر الخفيفة ، وأكثر العناصر استخداماً هو الرصاص ويتمتع الرصاص بقدرة عالية على امتصاص الأشعة الكهرومغناطيسية ، كما أنه رخيص الثمن وسهل التشكيل . وإذا أمعنا النظر في الرسومات الثلاث الموجودة في الشكل (5-9) تين لنا أن هنالك نقصاناً لأثر كمبيون وللأثر الكهروضوئي وزيادة في إنتاج الزوج مع الزيادة في طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية وأن هنالك حد أدنى للامتصاص الكلي عند  $3 \text{ MeV}$  في الرصاص و  $10 \text{ MeV}$  في النحاس و  $22 \text{ MeV}$  في الأليوم .



شكل 5-9

العلاقة ما بين الطاقة للفوتون والمقاطع المستعرضة الذرية لكل من الأثر الكهروضوي وتشتت كمبتون وإنتاج الزوج في كل من الألمنيوم والنحاس والرصاص .



#### 5-4-7 معامل الامتصاص Absorption Coefficient

تؤدي جميع الطرق التي تتفاعل فيها أشعة جاما مع المادة إلى نقصان أسّي في شدة طاقة الفوتونات الساقطة . وتساوي شدة الأشعة المارة  $I_d$  عبر السمك  $d$  للماص ما يلي :

$$I_d = I_0 e^{-\mu d} \quad (5-17)$$

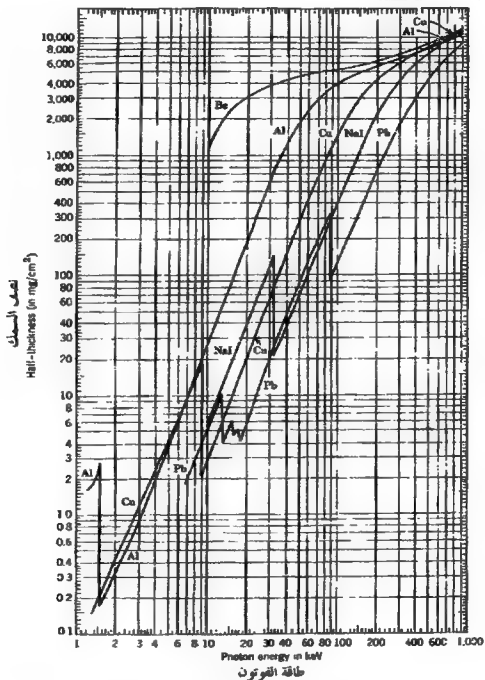
حيث أن  $I_0$  شدة الأشعة الساقطة و  $\mu$  معامل الامتصاص الكلي . و  $\mu$  عبارة عن مجموع معاملات الامتصاص لكل من الأثر الكهروضوئي وأثر كمبتون وإنتاج الزوج . ومن ثم عرف العلماء نصف السمك  $d_{1/2}$  على أنه السمك الذي يؤدي إلى  $I_d = I_0 \frac{1}{2}$  و  $d_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$  half-thickness .  
ويعطى سمك الماص في الغالب بدلالة الكثافة السطحية (pd) (غم/سم<sup>2</sup>) .  
فلهذا نكتب المعادلة (5-17) كالآتي :

$$I_d = I_0 e^{-(\mu/p)p d} \quad (5-18)$$

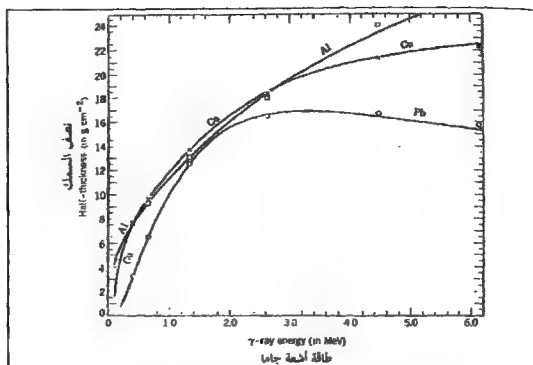
و  $(\mu/p)$  عبارة عن معامل الامتصاص الكتلي .

#### Mass absorption coefficient

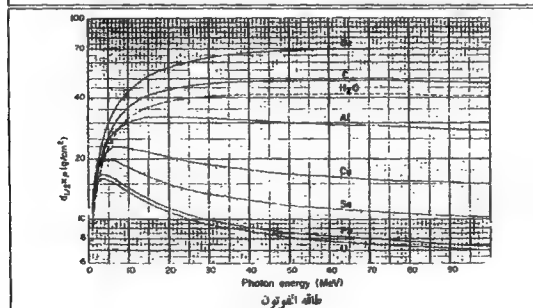
انظر الأشكال 5-10 ، 5-11 ، 5-12 ولاحظ أن محور (ص) في الشكل 5-12 هو  $d_{1/2p}$  وما لم يتم الامتصاص كلياً عبر الأثر الكهروضوئي فإن قياس الفوتونات الساقطة فقط غير ممكن عملياً . وذلك حاجة عملية القياس إلى ترتيب هندسي جيد (كوجود مسافة كبيرة بين المصدر والماص وبين الماص والكاشف) أو إلى كاشف يعمل فقط ضمن نطاق ضيق من الطاقة .



شكل 10-5 : العلاقة ما بين نصف السمك وطاقة الفوتون لكل من الألمنيوم والبريليوم والنحاس والرصاص ويوديد الصوديوم



شكل 5-11: العلاقة ما بين نصف السمك وطاقة أشعة جاما المتوسطة في كل من Al و Cu و Pb



شكل 5-12: امتصاص الفوتونات التي لها طاقة تصل إلى 100 MeV في مواد مختلفة

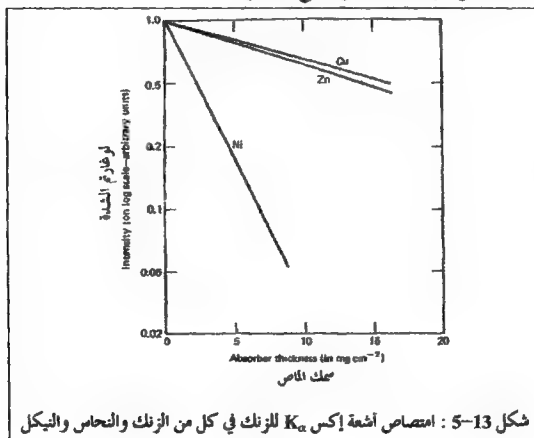
## 8-4-5 الامتصاص الحرج لأشعة إكس

### Critical Absorption of X-rays

لقد درسنا في ما سبق أن احتمالية الامتصاص الكهروضوئي تتوقف تماماً عندما تساوي قيم طاقة جاما أو إكس طاقة ربط الإلكترونات في المستويات الرئيسية (2-4) ولقد سمى العلماء هذه الحالات بحواف الامتصاص **absorption edges** . كما استخدم اختلافها من عنصر إلى آخر في قياس إشعاعات إكس المميزة لكل عنصر . ومن أجل أن نفهم الامتصاص الحرج علينا أن نذكر كيف تنطلق أشعة إكس من الذرة ، فإذا انتقل إلكترون من أحد المستويات الخارجية إلى فراغ في مستوى له طاقة ربط أعلى ، كانقال إلكترون من  $L$  إلى  $K$  ، انطلقت  $K_{\alpha}$  أشعة إكس . وأما الامتصاص الكهروضوئي فيحدث إذا كانت طاقة الفوتون كافية لنقل إلكترون من مستوى طاقته إلى مستوى فارغ . ولهذا ينظر للعنصر على أنه ماص رديء لأشعة إكس الخاصة به .

ولا يمكن لطاقة  $K_{\alpha}$  أشعة إكس أن تنقل إلكترون من مستوى  $K$  إلى أحد المستويات الخارجية الفارغة في نفس العنصر . ومع ذلك فإن طاقة ربط الإلكترونات تقل كلما قل العدد الذري  $Z$  ، ولهذا فإن خط  $K_{\alpha}$  المنبعث من عنصر له عدد ذري  $Z$  يتمتع بطاقة قيمتها أكبر بقليل من حافة الامتصاص  $K$  لعنصر له عدد ذري أقل بقليل فتمتص بقوة من قبل ذلك العنصر وليس من قبل العنصر الذي يعلوه . فلهذين العنصرين المجاورين معاملات امتصاص مختلفة كثيراً نحو تلك الأشعة ، فيسمى العنصر الذي يمتص أشعة إكس بقوة أكبر بالماص الحرج **Critical Absorber** لتلك أشعة إكس . ويطبق الامتصاص الحرج للخطوط المنبعثة من المستوى  $L$  على العناصر الثقيلة . ومن الأمثلة على ما سبق المثال التالي : طاقة  $K_{\alpha}$  أشعة إكس لعنصر

الخارصين Zn ( $Z = 30$ ) 8.6 KeV ، وحواف الامتصاص لـ  $^{64}\text{Ni}$  و  $^{64}\text{Cu}$  تساوي 9.0 KeV و 8.3 KeV على التوالي. فلذلك فإن  $^{64}\text{Ni}$  ماص جيد لـ  $K_{\alpha}$  أشعة إكس الصادرة عن Zn وليس  $^{64}\text{Cu}$  (شكل 5-13). أما  $K_{\alpha}$  أشعة إكس لعنصر الجاليوم ( $Z = 31$ ) فتمتص بقوة من قبل النيكل والنحاس وذلك لأن طاقتها 9.2 KeV ، ولا تمتص من قبل الخارصين الذي له حافة امتصاص K عند 9.7 KeV . تستخدم الماصات الحرجة في طمس أحد خطوط أشعة إكس ليتم قياس الطيف المنبعث من أحد الجيران دون أي تشويش . تحتوي بعض المراجع كدليل الكيمياء والفيزياء Handbook of Chemistry and Physics على جداول لخطوط أشعة إكس المنبثة وعلى حواف الامتصاص لجميع العناصر .



## 5-5 النيوترونات Neutrons

نظراً لانعدام الشحنة على النيوترونات فإن تفاعلها مع الإلكترونات قليل جداً ولا ينجم عن النيوترونات مباشرة أي تأين أساسي . ويقتصر تفاعل النيوترونات مع المادة على التأثير النووي والذي يتضمن التشتت المرنة وغير المرنة والتفاعلات النووية مثل  $(n, \gamma)$  و  $(n, p)$  و  $(n, \alpha)$  و  $(n, 2n)$  والانشطار .

### 5-5-1 التخفيف من سرعة النيوترونات

#### Slowing Down of Neutrons

هناك تشابه كبير بين النيوترونات الحرارية وجزيئات الغاز في توزيع الطاقة عند درجات الحرارة العادية . ولهذا فإنها فعالة في التفاعلات النووية . ولقد قام العلماء بإجراء الكثير من الدراسات النظرية والعملية المهادفة إلى التقليل من طاقة النيوترونات ذات الطاقة العالية والناجمة عن التفاعلات النووية بحيث تصبح نيوترونات حرارية لا تصدى طاقتها 1 eV .

قد تفقد النيوترونات السريعة جزءاً كبيراً من طاقتها في الاصطدامات غير المرنة مع النوى الثقيلة خاصة . وقد تبين أن هذه الطريقة غير فعالة في إنتاج النيوترونات الحرارية . وتنتج النيوترونات الحرارية عن عدة تصادمات مرنة متتابعة مع النوى . وبناءً على قانون حفظ الزخم فإن النيوترون الذي له طاقة  $E_0$  والمصطدم بمرنة مع نواة ثقيلة يرتد حاملاً معظم طاقته الأصلية ولا يعطي من طاقته أكثر من  $4AE_0/(A+1)^2$  للنواة المرتدة (A هو العدد الكتلي للنواة الهدف) . فكلما نقص العدد الكتلي للنواة الهدف ازداد جزء الطاقة المفقود من طاقة النيوترون الحركية والمنقول للنواة الهدف في التصادم المرن . ولهذا فإن للمواد التي تحتوي على الهيدروجين كالماء والماء فعالية كبيرة في التخفيف من سرعة النيوترونات .

نجد في التشتت المرن للنيوترونات ذات الطاقة التي تقل عن 10 MeV تساوي في احتمالية انتقال الطاقة ما بين صفر والحد الأعلى  $4AE_0/(A+1)^2$  . وعلى هذا فإن احتمالية أن يكون لنيوترون ذات طاقة  $E_0$  طاقة باقية ما بين  $E$  و  $E+dE$  هي :

$$P(E)dE = \frac{dE}{4AE_0/(A+1)^2} \quad (5-19)$$

ومعدل طاقة النيوترون بعد ذلك هي :

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \int_{E_0[1-4A/(A+1)^2]}^{E_0} P(E)EdE = \frac{(A+1)^2}{4AE_0} \int_{E_0[1-4A/(A+1)^2]}^{E_0} EdE \\ &= E_0 \left[ 1 - \frac{2A}{(A+1)^2} \right] \end{aligned} \quad (5-20)$$

أي أن معدل قيمة  $\frac{E}{E_0}$  لا يعتمد على  $E_0$  ، وتساوي قيمته بعد  $n$  من التصادمات ما يلي :

$$\frac{\bar{E}_n}{E_0} = \left[ 1 - \frac{2A}{(A+1)^2} \right]^n \quad (5-21)$$

وإن احتمالية أن يكون لنيوترون ذات طاقة  $E_0$  طاقة ما بين  $E_n$  و

$E_n + dE_n$  بعد عدد  $n$  من التصادمات المنة مع نوى الهيدروجين هي :

$$P_n(E_n)dE_n = \int_{E_n}^{E_0} [dE_{n-1} P_{n-1}(E_{n-1})] \left[ \frac{dE_n}{E_{n-1}} \right] \quad (5-22)$$

ويمثل القوس الأول في المعادلة (5-22) احتمالية الحصول على طاقة ما بين

$E_n$  و  $E_n + dE_n$  في  $(n-1)$  من التصادمات وأما القوس الثاني فيمثل احتمالية

الذهاب من الفسحة  $E_{n-1} + dE_{n-1} \leftarrow E_{n-1}$  إلى الفسحة  $E_n \rightarrow E_n + dE_n$  بعد

عدد  $n$  من التصادمات . وبتكامل المعادلة (5-22) ضمن المتغير  $E_{n-1}$  نحصل على:

$$P_n(E_n) = \frac{1}{(n-1)! E_0} \left( \ln \frac{E_0}{E_n} \right)^{n-1} \quad (5-23)$$

ولقد وجد العلماء أن معدل عدد التصادمات اللازمة لتقليل طاقة النيوترون من  $E_0$  إلى  $E$  في مادة عديمها الكتلي  $A$  هو :

$$\bar{n} = \frac{\ln(E_0/E)}{1 - \left[ (A-1)^2 / 2A \right] \ln[(A+1)/(A-1)]} + 1 \quad (5-24)$$

ففي حال كانت التصادمات مع الهيدروجين النري أو البروتونات ( $A = 1$ ) حصلنا على قيمة للمقام تساوي واحد في المعادلة (5-24) على النحو التالي :

$$\bar{n} = \frac{\ln(E_0/E)}{1 - \text{صفر}} + 1 \quad (5-25)$$

وتكتب المعادلة (5-25) على الشكل التالي :

$$E_n = E_0 e^{1-\bar{n}} \quad (5-26)$$

أي أن معدل عدد التصادمات اللازمة لتحويل نيوترونات طاقتها عدة ملايين إلكترون فولت إلى نيوترونات حرارية طاقتها أقل من 0.04 eV عند درجات الحرارة العادية هو 20 تصادم . وتقوم بهذه العملية طبقة من شمع البرافين سمكها 20 سم في أقل من  $10^{-3}$  ثانية . أما المصير النهائي للنيوترونات الحرارية في وسط هيدروجيني مثل الماء أو البرافين فهو أن تلتقط من قبل البروتونات لتكون الديوترونات ( $^2_1D$ ) ، علماً بأن احتمالية حدوث هذا التفاعل قليلة بالمقارنة مع تشتت النيوترونات ، فلهاذا تقوم النيوترونات بحوالي 150 تصادم قبل أن تلتقط من قبل البروتونات . فالماء والبرافين من المواد المستخدمة في تبطيء النيوترونات وذلك لأن احتمالية التصادم الأكسجين والكربون للنيوترون قليلة (أي أن المقطع المستعرض الانعكاسي لكل منهما قليل) بالمقارنة مع تلك للهيدروجين .



وأما الماء الثقيل فله أفضلية على الماء العادي  $H_2O$  وذلك لأن احتمالية التقاط النيوترون من قبل الديوتيريوم  $D^2$  قليلة بالمقارنة مع الهيدروجين ، ويستخدم الجرافيت (الكربون) في إعطاء النيوترونات ولكنها تحتاج إلى عدد أكبر من التصادمات (حوالي 120) لتصل بعدها إلى نيوترونات حرارية ويمتاز الجرافيت عن البقية في إمكانية تواجده النيوترونات الحرارية فيه لمدة أطول . ولا يتعدى متوسط العمر للنيوترونات الحرارية في أي مادة من المواد أجزاء من الثانية قبل أن تلتقط . وإذا لم يتم التقاطها فإنها ستتحلل إلى بروتونات وإلكترونات سالبة (ارجع إلى جـ 2-3 و 3-4).

### 5-5-1 التوزيع الحراري Thermal Distribution

إذا قارنا بين النيوترونات الحرارية وجزيئات الغاز وجدنا الحقيقة المشتركة وهي أن لا يمكن أن يكون لكل النيوترونات الحرارية نفس الطاقة . ففصل طاقة النيوترونات أو تزيد نتيجة للاصطدامات مما يعني وجود توزيع ماكسول لطاقة أو لسرعة النيوترونات الحرارية . ويساوي ذلك الجزء من العدد الكلي من النيوترونات والتي لها سرعة ما بين  $v$  و  $v+dv$  ما يلي :

$$F(v)dv = 4\pi^{-1/2} \left( \frac{M}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-Mv^2/2kT} dv \quad (5-27)$$

حيث أن  $M$  كتلة النيوترون و  $T$  درجة الحرارة المطلقة و  $k$  ثابت بولتزمان . وبعض خصائص هذا التوزيع موجودة في الفصول التي تبحث النظرية الجزيئية الحركية للغازات ومنها السرعة ذات الاحتمال الأكثر ( $v_m$  السرعة الأكثر احتمالاً) .

$$v_m = \left( 2 \frac{kT}{M} \right)^{1/2} \quad (5-28)$$

ومعدل السرعة :

$$\bar{v} = \left( \frac{8kT}{\pi M} \right)^{1/2} = 2 \frac{v_m}{\pi^{1/2}} \quad (5-29)$$

ومعدل الطاقة الحركية :

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (5-30)$$

يعتمد معدل طاقة النيوترونات على درجة حرارة الوسط المستخدم في التخفيف من سرعتها . فتوزيع ماكسول غير فعال عند درجات الحرارة المنخفضة بسبب مستويات الطاقة المخافض عليها في ذرات الوسط المرتبطة ، وأيضاً فهو غير فعال إذا كان مسار النيوترون في الوسط قصير عند جميع درجات الحرارة أو إذا حدث تغيير كبير في التوزيع نتيجة امتصاص النيوترونات أو تسربها من السطح . يجب أن نوضح الفرق بين توزيع السرعة في الوسط وبين التوزيع التي تكسبه عينة موجودة في الوسط . ويختلف العزيمان بسبب أن احتمالية اصطدام النيوترون بالبيئة في وقت ما تتناسب طردياً مع  $v$  . ونعبر عن التوزيع المتغير بالمعادلة (5-31) . والتوزيع المتغير مهم في التفاعلات النووية وفي حسابات المقطع العرضي .

$$F'(v)dv = 2 \left( \frac{M}{2kT} \right)^2 v^3 e^{-Mv^2/2kT} dv \quad (5-31)$$

## 5-6 الوقاية من الإشعاع Radiation Protection

تتجمل التأثيرات البيولوجية للإشعاعات عن الطفرات الكيميائية التي تحدث في الخلايا نتيجة التأين والنهيج والتكسير للروابط والإزاحة للذرات . ولتقدير مدى تأثير الإشعاعات على الأعضاء الحية من المواد المشعة الموجودة خارج الأعضاء أو داخل الجهاز الهضمي أو داخل الجهاز التنفسي ، علينا أن لا نأخذ الجرعات الكلية للتأين الناتج في الأعضاء فقط وإنما نأخذ عوامل أخرى ككثافة التأين وسرعة الجرعة ومكان التأثير وسرعة إعطاء وإزالة المادة المشعة .

لم يثبت بالدليل أن التعرض المباشر من قبل الإنسان للإشعاعات غير ضار بالصحة . ومن المحتمل أن تتسبب بعض الطرق المستخدمة في التشخيص والتي تستخدم الإشعاعات في إحداث أورام خبيثة بدل من الكشف عنها فقط . أي أن

التعرض للإشعاع مرتبط بمبدأ المخاطرة/الفائدة (أو الميزة/المضرة). ومن سوء الحظ أنه لم يتم لحد الآن قياس تأثير التعرض لكميات صغيرة من الإشعاعات .

## 1-6-5 قياس الجرعة في الوقاية من الإشعاع

### Dosimetry in Radiation Protection

تعرفنا فيما سبق إلى وحدة الريم والراد في (7-4) وإلى العلاقة بينهما والمعامل الخاص الذي يربطهما ، ويعتمد هذا المعامل على عدة عوامل أهمها :

كثافة التأين في الدراسات البيولوجية والتي تقاس بقدرة الإيقاف الخطية **Linear Energy Transfer (LET)** وهي عبارة عن الطاقة الموضوعة في وحدة طول المسار ويسمى هذا المعامل بعامل الجودة **Quality Factor (QF)** ، وبين الجدول (2-5) بعض القيم التقريبية لـ **QF** ، ونعكس القيم في الجدول اعتماد **QF** وقدرة الإيقاف الخطية على الطاقة ومن الحرص أن تستخدم القيم العليا للمدى في القيم المذكورة في الجدول في غياب أي دليل على عكس ذلك . وبين المثال التالي التطبيقات العملية للمفاهيم التي تعلمناها في هذا الفصل .

الإشعاع Radiation	QF
X and $\gamma$ rays	1
$e^-$ , $e^+$ Electrons and positrons	1
(n) Neutrons, energy < 10 keV	3
(n) Neutrons, energy > 10 keV	10
(p) Protons	1-10
( $\alpha$ ) Alpha particles	1-20
أيونات ثقيلة Heavy ions	20

جدول 2-5 : قيم عامل الجودة للإشعاعات المختلفة .

مثال (5-1) ما هو معدل الجرعة المتوقع على بعد 50 سم من مصدر  $^{60}\text{Co}$  نشاطه 100 ميكوري بوحدة الراد/ساعة .

الحل : يواكب كل تحلل من  $^{60}\text{Co}$  انطلاق فوتونان بطاقة 1.17 و 1.33 MeV . وللتبسيط سنأخذ معدلها 1.25 MeV .

$$\frac{\text{فوتون}}{\text{ثانية}} = 7.4 \times 10^9 = 2 \times 100 \times 3.7 \times 10^7$$

فيض جاما على بعد 50 سم =

$$\frac{\text{فوتون}}{\text{ثانية سم}^2} = 2.3 \times 10^5 = 7.4 \times 10^9 / (4\pi \times 2500)$$

$$\text{أو} = 2.3 \times 10^5 \times 1.25 \times 10^6 = 2.9 \times 10^{11} \text{ eV سم}^{-2} \text{ ث}^{-1}$$

بما أن معامل الامتصاص الكلي لفوتون طاقته 1.25 MeV في الهواء يساوي تقريباً معامل الامتصاص في الألمنيوم ونصف السمك لذلك الفوتون من الشكل 10-5 يساوي 12.5 غم/سم<sup>2</sup> . وجزء الطاقة المفقود من أشعة جاما/غم سم<sup>-2</sup> في

$$\text{الهواء هو } \mu/\rho = \frac{0.693}{12.5} = 0.055 .$$

أي أن الطاقة المفقودة من جاما لدى مرورها في 1 غم/سم<sup>2</sup> هواء هي =

$$= 0.055 \times 2.9 \times 10^{11} \times 3600 = 5.7 \times 10^{13} \text{ eV/ساعة} = 92 \text{ إرغ/ساعة} .$$

أي أن الطاقة الممتصة من قبل واحد غرام هواء =  $\frac{92}{100}$  راد/ساعة

$$= 0.92 \text{ راد/ساعة} .$$

## 2-6-5 دليل الوقاية من الإشعاع

### Radiation Protection Guide

لم يحدد بشكل واضح الحد الأعلى من مكافئ الجرعة من الإشعاعات المسموح التعرض لها ، وقد يدخل هذا ضمن مبدأ المخاطرة/الفائدة (أو الضرر/المنفعة) المذكور سابقاً . وهذا الكلام صحيح في كثير من الحالات في ما عدا بعض طرق العلاج التي تستخدم فيها جرعات كبيرة من الإشعاع الموجه نحو الأورام . ويتساءل الكثير من المختصين إذا كان هناك مستوى أدنى من الجرعات لا ينتج عنه تأثيرات جينية وجسدية . وهناك صعوبة كبيرة في قياس التأثيرات الناجمة عن جرعات صغيرة من الإشعاعات في وجود التأثيرات الجينية والجسدية الطبيعية المستمرة . ولهذا افترض العلماء أن التأثيرات الضارة للإشعاعات تتناسب طردياً مع مكافئ الجرعة المتص ، مما يعني عدم وجود مستوى أدنى .

وفي ضوء هذه الصعاب صدر دليل الوقاية من الإشعاعات والذي اعتمد الدراسات العلمية للتأثيرات البيولوجية الناجمة عن الإشعاعات في الثمانين سنة الماضية . وتشتمل هذه الدراسات على :

- أ ( الفحوص المخبرية على الحيوانات .
- ب) تأثيرات العلاج بالإشعاع على المرضى والمعالجين .
- ج) الاستخدامات الصناعية للإشعاعات .
- د ( الأضرار التي لحقت بسكان هيروشيما وناغازاكي نتيجة للقنابل النووية الملقاة عليهما .

ويحتوي الدليل على مجموعتين :

- أ ( الأشخاص الذين يتعرضون للإشعاعات نتيجة العمل الذي يقومون به .

ب) عامة الناس بشكل كبير .

ولقد أوصى الدليل للأشخاص في المجموعة ( أ ) بأن لا يتعرض أجسامهم الكاملة لأكثر من 5 ريم/السنة ، وقد تختلف الجرعة من منطقة إلى أخرى في الجسم، فقد يصل الحد الأعلى المسموح به للأيدي إلى 75 ريم/الساعة ، ولا يجب أن تتعدى الجرعة التراكمية على المدى الطويل لشخص عمره N سنة القيمة

$$= 5 \text{ ريم} (N-18)$$

وأما الأشخاص من عامة الشعب (المجموعة ب) فلقد أوصى بأن لا يتعرض لأكثر من 0.50 ريم/السنة بما في ذلك الإشعاع الطبيعي (الناتج عن الأشعة الكونية والنشاط الإشعاعي في المحيط الذي نعيش فيه والنظائر المشعة الموجودة داخل الجسم) والاستخدامات الطبية . وبلغ الإشعاع الطبيعي في الولايات المتحدة عند سطح البحر 0.12 ريم/السنة ويزداد إلى 0.25 ريم/السنة على ارتفاع 1500م فوق سطح البحر . أما LD<sub>50</sub> في الإنسان فيساوي 500 ريم يتعرض لها الإنسان في فترة قصيرة من الزمن . ومن الصعب تحديد مكافئ الجرعة التي يحصل عليها الإنسان من عمليات التشخيص الطبي ، وقد قدرها البعض بعدة مئات من المليريم في السنة في معظم الأحيان وقد تصل إلى أعلى من ذلك في بعض الحالات . وفي الخلاصة ليس هناك إجماع على أن القيم المقروحة في الدليل رزينة وحريصة ، وظهر بعض الناس الذين يطالبون بتخفيض القيم إلى النصف .

### 3-6-5 مصادر الإشعاع الداخلية

#### Internal Radiation Sources

يتعرض الجسم للإشعاعات إما من مصادر داخلية أو خارجية . وقد تبقى

بعض النظائر المشعة التي تدخل جسم الإنسان عبر الجهاز الهضمي أو التنفسي لفترات زمنية مختلفة كل حسب طبيعته . ولهذا وجب علينا الحرص لتجنب دخول المواد المشعة لأجسامنا . وبين الجدول (3-5) الحد الأقصى المسموح به من التركيز لبعض النظائر المشعة في السوائل المهضومة والهواء المستنشق كما يبين الحد الأعلى المسموح به من الكميات في الجسم .

النواة Nuclide	العاملون Occupational Exposure		عمامة الناس General Public		الأعضاء الحرجية In Critical Organ (μCi)
	( Restricted Area )		( Unrestricted Area )		
	الهواء In Air (μCi ml <sup>-1</sup> )	الماء In Water (μCi ml <sup>-1</sup> )	الهواء In Air (μCi ml <sup>-1</sup> )	الماء In Water (μCi ml <sup>-1</sup> )	
<sup>3</sup> H(H <sub>2</sub> O)	5×10 <sup>-6</sup>	1×10 <sup>-1</sup>	2×10 <sup>-7</sup>	3×10 <sup>-3</sup>	1000
<sup>14</sup> C(CO <sub>2</sub> )	4×10 <sup>-6</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-7</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	300 (fat) <sup>الدهن</sup>
<sup>24</sup> Na	1×10 <sup>-6</sup>	6×10 <sup>-3</sup>	4×10 <sup>-8</sup>	2×10 <sup>-4</sup>	7.0 (G.I. tract) <sup>الجهاز الهضمي</sup>
<sup>32</sup> P	7×10 <sup>-8</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	2×10 <sup>-9</sup>	2×10 <sup>-5</sup>	6.0 (bone) <sup>العظام</sup>
<sup>35</sup> S	3×10 <sup>-7</sup>	2×10 <sup>-3</sup>	9×10 <sup>-9</sup>	6×10 <sup>-5</sup>	90.0 (testes) <sup>الخصية</sup>
<sup>60</sup> Co	3×10 <sup>-7</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-8</sup>	5×10 <sup>-5</sup>	10.0 (G.I. tract) <sup>الجهاز الهضمي</sup>
<sup>90</sup> Sr	1×10 <sup>-9</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	3×10 <sup>-11</sup>	3×10 <sup>-7</sup>	2.0 (bone) <sup>العظام</sup>
<sup>131</sup> I	9×10 <sup>-9</sup>	6×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	3×10 <sup>-7</sup>	0.7 (thyroid) <sup>الغدة الدرقية</sup>
<sup>137</sup> Cs	6×10 <sup>-8</sup>	4×10 <sup>-4</sup>	2×10 <sup>-9</sup>	2×10 <sup>-5</sup>	30 (whole body) <sup>الجسم</sup>
<sup>210</sup> Po	5×10 <sup>-10</sup>	2×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-11</sup>	7×10 <sup>-7</sup>	0.03 (spleen) <sup>الكبد</sup>
<sup>226</sup> Ra	3×10 <sup>-11</sup>	4×10 <sup>-7</sup>	3×10 <sup>-12</sup>	3×10 <sup>-8</sup>	0.1 (bone) <sup>العظام</sup>
<sup>238</sup> U	7×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	3×10 <sup>-12</sup>	4×10 <sup>-5</sup>	0.005
<sup>239</sup> Pu	2×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	6×10 <sup>-14</sup>	5×10 <sup>-6</sup>	0.04 (bone) <sup>العظام</sup>

جدول 3-5 : الحد المسموح به بيولوجياً لبعض النظائر المشعة .

#### 4-6-5 المخاطر التي نواجهها أثناء التعامل مع المواد المشعة

##### Hazards Encountered with Radioactive Materials

تبين لنا مما سبق أهمية الحرص في التعامل مع المواد المشعة أو المصادر المشعة ولهذا وجب على كل شخص التعامل مع كمية الإشعاع التي يتعرض لها إلى أدنى حد ممكن بحيث لا يتعدى الحدود القصوى المسموح بها . ويتم تخفيض جرعة التعرض بالطرق التالية :

أ ) الحجاب الواقي .

ب) المسافة .

ج) أ و ب .

وتعتبر طريقة التعامل مع الإشعاعات من الأمور المهمة التي يجب الانتباه لها حتى لو كان مستوى الإشعاع قليل جداً وذلك لخطورة انتشار التلوث بالمواد المشعة .

يؤدي التلوث بالمواد المشعة إلى زيادة الإشعاع الطبيعي والضرر بالتجارب التي تستخدم مستويات قليلة من النشاط الإشعاعي . وهذا يوجب درجة عالية من الانتباه لضبط التلوث وللحيلولة دون التعرض المفرط للإشعاعات ، وهذا يعتمد على عدة عوامل منها مقدار النشاط الإشعاعي الذي نتعامل معه ، طبيعة وطاقة الإشعاعات المنطلقة ، نصف عمر للمادة المشعة وأخيراً الخواص الكيميائية للمادة المشعة .

هناك تدابير وقائية عامة يجب توفرها في كل الأعمال التي تستخدم المواد المشعة . وتشتمل على :

أ ) أجهزة مسح وقياس للإشعاعات لمعرفة مستوى الإشعاعات والاحتياطات الواجب توفرها .



ب) تجرى التجارب في خزانة الغازات التي تسمح بمرور تيار من الهواء أو في الصناديق الجافة .

ج) ومن أجل أن نحوي أي دلق للمواد المشعة علينا العمل في صواني مخصصة أو نغطي سطوح الطااولات في المختبر بورق ماص يمنع التسرب .

د ) عدم استخدام الفم لسحب السوائل بواسطة الماصة .

هـ) يجب استخدام القفازات والملاقط عند التعامل مع المواد المشعة حتى لو كان نشاط العينة بالميكروكوري .

و ) إذا تعاملنا مع مستويات عالية من المواد المطلقة لأشعة جاما (مليكوري) وجب الوقوف خلف حجاب من الرصاص واستخدام الملاقط وأدوات أخرى مناسبة.

ز ) وفي حال وصلت المستويات إلى درجة عالية جداً ( $10^{12}$  جاما فوتون/الدقيقة) وجب استخدام طرق التحكم عن بُعد . ولقد أدى ذلك إلى تطوير طرق العمل الكيميائية لتناسب مع التحكم عن بُعد .

### الأسئلة :

- 1) ما هو المدى لأيونات  $^{14}\text{N}$  طاقتها 120 MeV في الألمنيوم .
  - 2) استخلم المعادلة (2-5) في حساب قدرة الإيقاف للدقائق ألفا طاقتها 12 MeV في الرصاص ( $I = 788 \text{ eV}$ ) .
  - 3) قارن بين القيمة المحسوبة مع القيمة المقدرة من الشكلين (4-5) و (5-5) .
  - أ) ما هو سمك صفيحة الألمنيوم اللازمة لحفض طاقة أيونات  $^4\text{He}$  من 40 MeV إلى 32 MeV .
  - ب) ما مقدار الطاقة التي يفقدها 20 MeV ديوترون (أيون ديوتيريوم) لدى مروره عبر نفس الصفيحة .
  - 4) تم قياس منحى الامتصاص لعينة تطلق إشعاعات  $\gamma$  و  $\beta$  باستخدام عداد التناسب الغازي وصفائح من الألمنيوم الماص ، كما هو مبين في الجدول .
- | سمك ماص الألمنيوم غم/سم <sup>2</sup> | النشاط الإشعاعي (تحلل/دقيقة) |
|--------------------------------------|------------------------------|
| 0                                    | 5800                         |
| 0.070                                | 3500                         |
| 0.130                                | 2200                         |
| 0.200                                | 1300                         |
| 0.300                                | 600                          |
| 0.400                                | 280                          |
| 0.500                                | 120                          |
| 0.600                                | 103                          |

101	0.700
100	0.800
98	1.00
92	2.00
80	4.00
65	7.00
53	10.00
40	14.00

(أ) قدر طاقة  $\beta$  التقصى بوحدة MeV .

(ب) ما هي طاقة أشعة جاما .

(ج) ما هي قيمة معامل الامتصاص لأشعة  $\gamma$  في الرصاص ؟

(6) ما هي قيمة التضاوت للدقائق ألفا طاقتها 32 MeV في الهواء .

(7) ارجع إلى الجداول الخاصة بطيف أشعة إكس ومعاملات الامتصاص

لأشعة إكس في دليل الكيمياء والفيزياء في المكتبة لتحديد الماصات الحرجة اللازمة

في التعرف على أشعة إكس  $K_{\alpha}$  في كل من (أ)  $^{37}\text{Ar}$  (ب)  $^{101}\text{Pd}$  .

(8) وجد أن معدل الجرعة لمصدر من  $^{137}\text{Cs}$  مطلق لأشعة جاما على بعد

60سم منه 137 مليراد/الساعة . فإذا كانت نسبة التحلل بجاما 85% وطاقة جاما

0.66 MeV . فاحسب

(أ) قدر قوة مصدر  $^{137}\text{Cs}$  بوحدة الميكروري .

(ب) ما هو سمك الرصاص (بوحدة المليمتر) اللازمة لخفض معدل الجرعة على

بعد 60سم إلى 3 مليراد/الساعة .

9) وضع مصدر من  $^{137}\text{Cs}$  قوته 100 ميكروني على بعد 20 سم من باطن الكف .

- أ) احسب فيض أشعة  $\gamma$  لكل سم<sup>2</sup> لكل ثانية الساقط على باطن الكف .  
 ب) احسب معدل الجرعة بوحدة الراد/ثانية لما جاء في ( أ ) (افرض أن الكف مكون من الماء وأن قيمة  $\mu/\rho$  لـ 0.66 MeV هي 0.03 سم<sup>2</sup>/غم) .  
 10) احسب معدل عدد الاصطدامات المرنة اللازمة لإبطاء النيوترونات من  $10^6$  eV إلى  $10^{-2}$  eV في كل من أ)  $^{238}\text{U}$  ب)  $^{12}\text{C}$  ج)  $^1\text{H}$  .

## الفصل السادس

### أجهزة كشف وقياس الإشعاع النووي

#### RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT

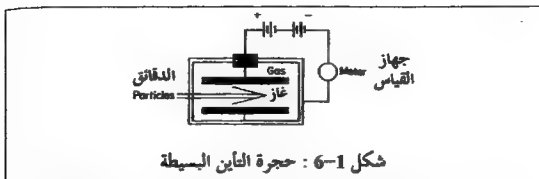
##### 6-1 مقدمة

تستخدم العدادات Counters في الكشف عن الإشعاعات وقياسها وتعتمد العدادات في عملها على تفاعلات الإشعاعات مع المادة من تأين وتهيج كما جاء في الفصل الخامس . ففي عدادات التاسب وحجرات التأين وضبه الموصلات وجايجر تُجمع الشحنة الكهربائية لأزواج الأيونات ثم تكبر إلكترونياً . يحدث مرور الدقائق وأشعة جاما في بعض المواد العضوية وغير العضوية تهيج في المستويات الذرية والتي تحلل بعد ذلك بإطلاق الضوء في المنطقة المرئية أو القريبة منها . وفي عدادات الوميض يتحول الضوء الناتج إلى نبضات كهربائية وبهذه الطريقة يتم عد الدقائق .

ولقد استخدم العلماء عدادات ودوائر كهربائية معقدة في القياسات الخاصة، كما في تشخيص الأنواع الجدينة من الدقائق . وسندرس في هذا الفصل أشهر أنواع العدادات .

##### 6-2 حجرات التأين Ionization Chambers

وهي من أبسط الأنواع ومبدأ عملها هو تكون الإلكترونات والأيونات الموجبة نتيجة مرور الدقائق المشحونة في الغاز الموجود داخل الحجرة والتي تتجمع على القطبين بتأثير المجال الكهربائي . ويبين الشكل (1-6) حجرة التأين البسيطة والتي تتجمع فيها الإلكترونات على اللوحة العليا ذات الشحنة الموجبة والأيونات الموجبة على اللوحة السفلى ذات الشحنة السالبة . ولا يشترط استعمال غاز معين في هذه الحجرات .



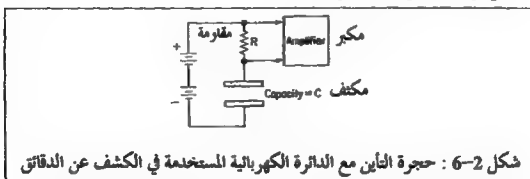
فإذا مر  $N$  من الدقائق/الثانية فإنها ستفقد  $E$  MeV من الطاقة والشحنة الكلية الناتجة (موجة وصالية)/الثانية تساوي :

$$Q = \frac{2NEe \times 10^6}{35} \text{ e.s.u./sec} \quad (6-1)$$

حيث أن شحنة زوج الأيونات هي  $2e$  وأن معدل الطاقة المفقودة لكل زوج  $35 \text{ eV}$ .

فإذا كانت قوة المجال الكهربائي كافية كان من الممكن تجميع كل الإلكترونات والأيونات الموجبة مما يعني أن التيار المار في الدائرة يساوي  $Q/2$  ، وهي الشحنة اللازمة لإزالة الإلكترونات ومعادلة الأيونات الموجبة . وقد قدرت الشحنة اللازمة ببعض المئات من الفولتات . وإذا استخدم مقياس للتيار فلن يُعد الجهاز المبين في الشكل (6-1) كعداد وذلك لأن مقياس التيار بطيء جداً وغير حساس لوصول كل دقيقة لأنه سيعمل على دمج تأثير عدد من الدقائق ، أي أن القراءة ستتناسب مع عدد الدقائق الواصلة في الثانية ومع طاقتهم المفقودة في الغاز ويستفاد من هذا الكاشف في قياس الفيض الكبير من الدقائق ، فإذا طليت الجدران الداخلية للحجرة بطبقة من البورون تمكنا من قياس فيض النيوترونات وذلك لأن  $^{10}\text{B}$  يتفاعل توتوياً مع  $n$  منتجاً  $^7\text{Li}$  ودقيقة  $\alpha$  ، ومن ثم يتم قياس التأين الناتج عن دقائق  $\alpha$  و  $^7\text{Li}$  .

إذا قمنا بتوصيل حجرة التأين في الشكل (6-1) مع الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (6-2) استطعنا الكشف عن وصول كل دقيقة . فتجمع الإلكترونات الحرة على اللوحة الموجبة في حوالي  $10^{-6}$  ثانية ، بينما تحتاج الأيونات الموجبة الأقل إلى  $10^{-3}$  ثانية لتصل إلى اللوحة السالبة . ويؤدي تجمع الشحنة إلى مرور نبضة كهربائية في المقاومة  $R$  . ويتناسب فرق الجهد عبر المقاومة  $R$  مع التيار المار ، فكلما مرت دقيقة مؤينة ازداد فرق الجهد ازدياداً سريعاً ومن ثم ينقص مع مرور نبضة التيار ولهذا فإن قيمة  $R$  عالية جداً حوالي  $10^9$  أوم ويؤدي مرور تيار صغير جداً فيها إلى نبضة جهد سهل قياسها . بعد ذلك تكبر هذه النبضة ومن ثم تسجل بواسطة دائرة عد إلكترونية .



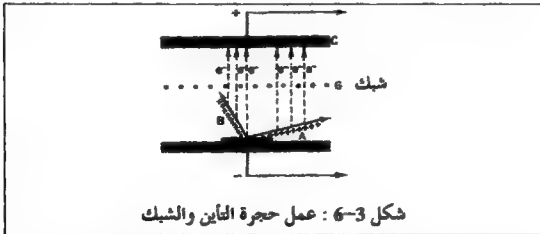
شكل 6-2 : حجرة التأين مع الدائرة الكهربائية المستخدمة في الكشف عن الدقائق

وإذا صمم العداد والمكبر للكشف عن نبضة الإلكترون الصاعدة سريعاً فقط فلا بد أن يسمح للإلكترونات بالتحرك السريع داخل الغاز في الحجرة . بعض الغازات مثل الأوكسجين والأبخرة التي تحتوي الهالوجينات لديها القدرة على التقاط الإلكترونات من قبل الجزيئات المتعادلة لتكون أيونات سالبة بطيئة الحركة ، وهذا يستوجب استبعاد هذه الغازات من حجرات الغاز المستخدمة ، واستبدالها بغاز الأرغون المخلوط بنسبة قليلة من الميثان أو ثاني أكسيد الكربون .

تستخدم حجرة التأين والدائرة الكهربائية (شكل 6-1 و 6-2) في الكشف

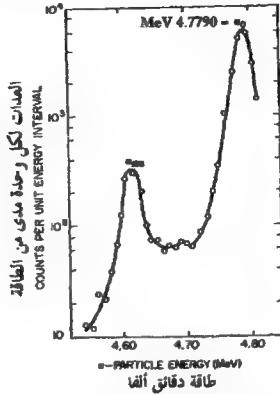
عن الدقائق المشحونة فقط ولا تصلح لقياس طاقة الدقائق .

ويعتبر قياس طاقة دقائق  $\alpha$  من مصدر موضوع فوق القطب السالب من أكثر التطبيقات شيوعاً . حيث تنطلق دقائق  $\alpha$  نحو الغاز وفي جميع الاتجاهات كما في الشكل (6-3) (A و B) . ثم تنتقل الإلكترونات مباشرة من جميع المسارات بسرعة نحو القطب النجم C وتبقى الأيونات الموجبة في الخلف متسببة بشحنة صغيرة على C ، وتعتمد قيمة الشحنة على المسافة بين C ومركز قفل مسار الأيون الموجب ، فالمسافة للمسار B أقل من تلك للمسار A . ولهذا فالنبضة الناتجة عن دقيقة B أقل من تلك الناتجة عن دقيقة A ، حتى لو تسببت كل منهما بنفس العدد من أزواج الأيونات ، وللتقليل من هذا التأثير وضع الشبك G كحجاب واق إلكتروستاتيكي بين الأيونات الموجبة والنجم . ويعمل هذا الحجاب بمجهود سالب كافٍ لمنع الإلكترونات من أن تنجذب له ، وما أنه يتكون من أسلاك رفيعة (قطرها 0.005 بوصة) وتبعد عن بعضها البعض حوالي 0.03 بوصة ، فهناك احتمال أن تمر بعض الإلكترونات من خلاله .



يعطي هذا النوع الخمس من حجرات التاين نبضة تتناسب طردياً مع عدد أزواج الأيونات الناتجة عن دقيقة ألفا ومع طاقتها وبغض النظر عن اتجاه المسار في الحجرة .





شكل 4-6 : طيف دقائق ألفا المنبعثة من  $^{226}\text{Ra}$

ويبين الشكل (4-6) طيف النبضة الناتجة عن عينة من  $^{226}\text{Ra}$ . وترمز  $\alpha$  إلى طاقة الدقائق الناتجة عن التحلل إلى المستوى الأرضي في  $^{222}\text{Rn}$  و  $\alpha_{188}$  عن التحلل إلى مستوى التهيج عند 188 KeV. وتنتج القمة في الوسط عن الكشف المتزامن لدقائق  $\alpha$  من  $\alpha_{188}$  والكرون التحول K الناتج عن تحلل مستوى التهيج في  $^{222}\text{Rn}$ . يعتمد وقت تجمع الإلكترونات على سرعة تحركها في الغاز وهي في طريقها إلى المجموع. وتبطئ الإلكترونات السريعة الأولية نتيجة لاصطدامها بـ جزيئات الغاز، علماً بأن قدرة الأرجون على إيقاف الإلكترونات ذات الطاقة القليلة ضعيفة. ويعزى هذا إلى توزيع الإلكترونات المكتمل والمستقر في الأرجون وطاقة تأينه العالية فلا يمكن أن تتكون مستويات ذات طاقة قليلة نتيجة لاصطدامات غير المرنة مع الإلكترونات، علماً بأن طاقة مستوى التهيج الأول 11.5 eV. وتعزى الزيادة

الكبيرة في معدل المسافة بين ذرات الأرجون والإلكترونات ذات الطاقة التي تقل عن 10 eV إلى ظاهرة كمية ميكانيكية تسمى بتأثير رمسور Ramsauer effect، ونحن نعلم أنه من غير الممكن إبطاء الإلكترونات في الأرجون النقي إلى 10 eV. وتساوي سرعة تحرك الإلكترونات  $v$  في الغاز الذي له ضغط  $P$  وتحت تأثير المجال الكهربائي  $E$  (قولت /سم) ما يلي :

$$v = \frac{eE\lambda}{P\sqrt{2me}} \quad (2-6)$$

حيث أن  $m$  كتلة الإلكترون ، و  $e$  معدل الطاقة الحركية للإلكترونات و  $\lambda$  المسار الحر المتوسط بين الاصطدامات .

إذا أضفنا نسبة قليلة من ثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  أو الميثان  $CH_4$  إلى الأرجون ازدادت احتمالية الاصطدامات غير المرنة وذلك لأن لهذه المركبات مستويات اهتزازية ودورانية ذات طاقة قليلة لديها القدرة على اكتساب الطاقة نتيجة للاصطدامات مع الإلكترونات . ولهذا يساوي معدل الطاقة  $e$  للإلكترونات في الأرجون المحتوي هذه الجزيئات عُشر (0.1) ذلك في الأرجون النقي . ويؤدي تأثير رمسور إلى الزيادة الكبيرة في  $\lambda$  ، وتزداد السرعة  $v$  نتيجة لهذه الزيادة والنقصان في  $e$  . فإذا أضفنا 10% من  $CH_4$  أو  $CO_2$  نقص الزمن اللازم لتجميع الإلكترونات في حجرة التأين المملوءة بالأرجون وزمن التحليل .

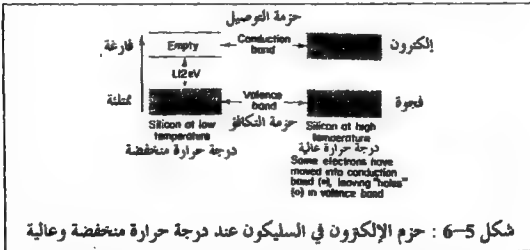
### 6-3 الكشافات شبه الموصلية Semiconductor Detectors

تستخدم العديد من الكشافات ظاهرة شبه التوصيل في بلورات السليكون والجرمانيوم ، وتسمى هذه العدادات بعدادات الحالة الصلبة وتستخدم هذه العدادات في تجارب التفاعلات النووية والظيف النووي . ومن أجل أن نفهم طريقة عملها علينا دراسة الخواص الكهربائية للسليكون

والجرمانيوم . وسنبدأ بدراسة السليكون .

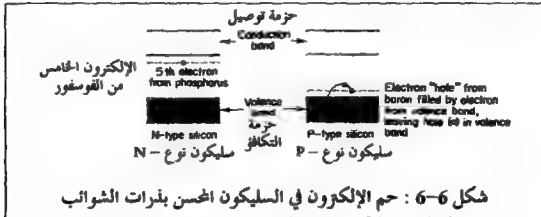
تحتوي ذرة السليكون المعزولة على أربع إلكترونات تكافؤ وتستخدم هذه الإلكترونات في عمل الروابط الكيميائية في بلورة السليكون ، أي أن هذه الإلكترونات مقيدة ولا يمكنها التحرك بحرية في شبكة السليكون . ولهذا فإن السليكون النقي موصل ضعيف للكهرباء عند درجة حرارة الغرفة . وتتأثر مستويات الطاقة العادية في ذرة السليكون المعزولة كثيراً بوجود ذرات السليكون المحيطة بها في الحالة البلورية .

تقع حزمة التوصيل فوق حزمة التكافؤ بمحالي  $1.12 \text{ eV}$  وتتكون حزمة التوصيل من حزمة عريضة من المستويات ، وتحرك فيها الإلكترونات بحرية وذلك لأنها لا ترتبط مع أي ذرة بعينها من ذرات السليكون ، وفي العادة تكون هذه الحزمة (حزمة التوصيل) فارغة من الإلكترونات ولهذا فإن السليكون موصل ضعيف . يؤدي التهييج الحراري إلى انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل ويزداد عددها كلما ازدادت درجة الحرارة (الشكل 5-6) .



إذا وضعنا ذرة الفسفور ذات الخمس إلكترونات تكافؤ في بلورة السليكون،

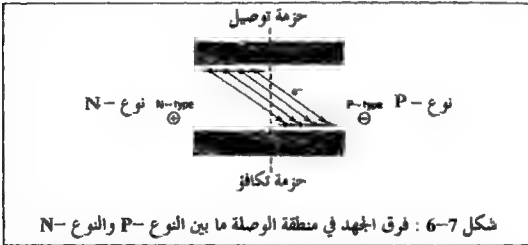
فإنها مستخدم أربع إلكترونات في عمل روابط مع ذرات السليكون المحيطة بها ،  
وأما الإلكترون الخامس فيسبحل مستوى طاقة أقل من حزمة التوصيل كما هو مبين  
في الشكل (6-6) . ولهذا يسمي الفسفور بالشائبة المانحة وسمي السليكون الذي  
يحتوي على مقدار ضئيل من الشائبة المانحة بالنوع N-type N- وترمز N إلى  
السالبية وذلك لوجود إلكترون زائد .



وأما إذا أضيفت ذرة البورون ذات الثلاث إلكترونات تكافؤ إلى بلسورة  
السليكون كان هناك إلكترون ناقص في موقع البورون مما سيؤدي إلى تعبئة هذا  
الغيب (الفجوة) hole من قبل إلكترون في حزمة التكافؤ وتكون لقب في حزمة  
التكافؤ وسبحل هذا الإلكترون مستوى من الطاقة أعلى بقليل من حزمة التكافؤ  
(الشكل 6-6) وذلك لضعف قوة جذب البورون لهذا الإلكترون بالمقارنة مع  
السليكون . وتسمى هذه الشوائب بالشوائب المتقبلة والسليكون الذي يحتوي على  
مقدار ضئيل منها بالنوع P-type P- ، وترمز P إلى الإيجابية وذلك لوجود  
إلكترون ناقص . ولقد سمي السليكون الذي لا يحتوي على شوائب وعلى عدد  
متساوي من الذرات المانحة والمتقبلة بالأصلي Intrinsic .

يحمل الإلكترون الزائد في النوع N- تياراً كهربائياً ، فلهذا فإنه موصل أكثر

من السليكون النقي ، كما تجعل الثقوب في حزمة التكافؤ في النوع P- المادة موصلة للتيار الكهربائي على الرغم من ثبات ذرات السليكون والبرون في أماكنها . وإذا وصلنا هذه المادة بقطبين موجب وسالب بينهما فرق جهد تحركت الإلكترونات نحو اليسار الموجب والتقطت الثقوب إلكترونات من ذرات السليكون على اليمين ، وهذا يعني أن ذرة السليكون الفاقدة للإلكترونات ستصبح موقع لثقب . ويمكن أن تعاد هذه العملية على أن يتحرك الثقب نحو اليمين والإلكترون نحو اليسار .



تخيل الآن ما سيحدث إذا وضعنا قطعة من النوع P- من السليكون ملاصقة لقطعة من النوع N- من السليكون (شكل 6-7) ، ستتحرك الإلكترونات الموجودة في مستوى طاقة أعلى في النوع N- عبر الحدود لتملأ الثقوب في النوع P- والموجودة في مستوى طاقة أقل . وهذا سيؤدي إلى فرق في الجهد في منطقة الوصلة بين النوع P و N من السليكون (شحنة سالبة وموجبة على الترتيب) . وكلما ازداد فرق الجهد نقص الفرق في مستويات الإلكترونات في النوعين إلى أن يصل إلى الصفر . وهذا يشبه حالة الاتزان التي لا يمر فيها التيار عبر الوصلة في أي من الاتجاهين ، أي أن كل الإلكترونات في النوع N- قد تحركت عبر الحدود لتملأ

جميع الثقوب في النوع P- وهذا يجعل السليكون الموجود عند الوصلة يستنفذ كل حامي التيار فيصبح غير موصل .

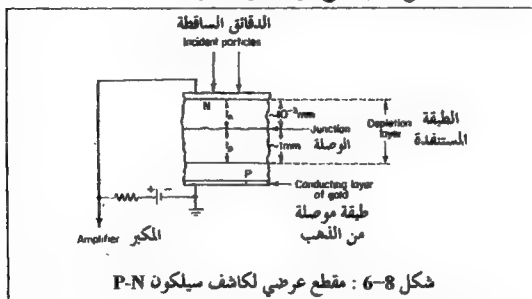
وإذا ازداد فرق الجهد أكثر من قبل عبر الوصلة ، أصبحت المنطقة N- أكثر إيجابية مما سيؤدي إلى تحرك الإلكترونات في المنطقة N- نحو القطب الموجب وبعيداً عن الوصلة . كما ستتحرك الثقوب في المنطقة P- بعيداً عن الوصلة ونحو القطب السالب . مما يعني زيادة في سمك المنطقة المستنفذة لحامي التيار وغير الوصلة ، وتأثر وصلة P-N باستقطاب عكسي .

أما إذا أثرنا على الوصلة بجهد معاكس للجهد السابق بحيث يصبح النوع - N سالباً والنوع P- موجباً فستتحرك الإلكترونات نحو المنطقة غير الوصلة من اتجاه وستتحرك الثقوب نحو نفس المنطقة من الاتجاه الآخر ، وهذا سيجعل المنطقة موصلة وسيمر تيار كبير عبر الوصلة .

تعمل الوصلة P-N وكأنها صمام ثنائي تمرر التيار في اتجاه ولا تمرره في الاتجاه المعاكس . تستخدم ثنائيات السليكون والجرمانيوم كمقومات للتيار في الأجهزة الحديثة .

أما إذا استعملت وصلة P-N كمعداد للدقائق فيجب أن تكون دائماً في وضع الاستقطاب العكسي . يُحدث مرور الدقائق المشحونة في المنطقة المستنفذة تهيجاً للإلكترونات إلى حزمة التوصيل وتكون الثقوب في حزمة التكافؤ . ويحرك انجذاب الكهربائي الإلكترونات نحو الجانب (N) الموجب والثقوب نحو الجانب (P) السالب . فتجري نبضة تيار إلى أن يصل كل حامي التيار سطح الكاشف ، ويعتمد زمن النبضة على سمك الكاشف وجهد الاستقطاب العكسي ، ويقاوح الزمن من حوالي  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  ثانية .

تعمل عدادات شبه الموصلة بنفس مبدأ عمل حجرة التآين ، وتصنع العدادات التي تحتوي على وصلة سليكون P-N بطرق مختلفة ، أفضلها يتم بنشر الفوسفور في السليكون إلى عمق  $10^{-3}$  ملم وعلى شرط أن يحتوي السليكون على كمية قليلة جداً من الشائبة من النوع P- (كما في الشكل 6-8) ، وتتكون الوصلة مباشرة تحت السطح حيث يلغى تركيز الفوسفور (الشائبة من النوع N-) تركيز الشائبة من النوع P- بالتعام . ثم يتم تبيخير طبقة موصلة من الذهب على الجهة الخلفية تثبت عليها الوصلات الكهربائية . وبقى على الوجه الأمامي للقرص جهد موجب بالنسبة للوجه الخلفي وذلك لتكوين طبقة مستنفذة من الماخين والمستقبلين ولتجميع التآين الناتج عن الدقائق المشحونة .



يزداد سمك الطبقة المستنفذة مع ازدياد الجهد المطبق أو المستخدم ، كما في المعادلتين التاليتين :

$$t_n = \left( \frac{eV}{2\pi e N_a} \right)^{1/2} \quad (6-3)$$

$$t_p = \left( \frac{eV}{2\pi e N_p} \right)^{1/2} \quad (6-4)$$

وتعرف  $t_p$  و  $t_p$  حسب ما جاء في الشكل (6-8) ، أما  $\epsilon$  فهو ثابت العزل للسليكون ،  $V$  الجهد المطبق ،  $e$  شحنة الإلكترون ،  $N_p$  و  $N_a$  عدد ذرات الشوائب من النوع  $N$ - والنوع  $P$ - في وحدة الحجم على الترتيب . وبما أن كمية الفسفور المنتشرة كبيرة فإن  $N_a$  كبيرة و  $t_p$  صغيرة . وأما الجزء الأكبر من الطبقة المستفدة  $t_p$  فهو الحساس في الكشف عن الإشعاعات . ومن أجل أن تكون الطبقة الحساسة ذات عمق كبير فيجب أن تكون  $N_p$  صغيرة جداً ، وهذا يعني أن يكون للسليكون درجة نقاوة عالية جداً . وهذه الدرجة من النقاوة متوفرة لأنها تستخدم في المقومات والصمامات الثابتة وغيرها من الأجهزة والأدوات الإلكترونية .

يختلف السليكون (والجرمانيوم) عن بقية المواد في الطاقة المفقودة من الدقيقة في تكوين زوج من الأيونات ، فلك تستهلك حوالي 35 eV /زوج من الأيونات ، أما السليكون والجرمانيوم فيحتاجان إلى 3.6 eV /زوج من الأيونات وذلك لأن حزمة التوصيل أعلى بـ 1.12 eV من حزمة التكافؤ . وهذا لا يعني أن مدى الدقائق فيهما كبير . ولا يختلف السليكون والجرمانيوم عن بقية المواد الأخرى في الحدث الرئيسي الذي تفقد فيها الدقيقة طاقتها ، علماً بأن جزء كبير من الطاقة الممتصة فيهما ينتهي في التأين الثانوي . تعتمد استبانة الطاقة التي يمكن الحصول عليها من عداد ما على التذبذب (التأرجح) الإحصائي في إعداد أزواج الأيونات الناتجة من الإشعاع الساقط . ويفرض في العداد المثالي عدم الاعتماد التام لكل حدث تأين على أحداث التأين الأخرى . ولهذا يتناسب عرض الطاقة لقمة الطيف طردياً مع الجذر التربيعي لعدد  $N$  من أزواج الإلكترون-الثقب الناتجة عن كل



دقيقة . وذلك لأن التذبذب في  $N$  من الأحداث المستقلة يتناسب طردياً مع  $\sqrt{N}$  .

$$\varepsilon\sqrt{N} = \Delta E, \text{ عرض القمة} \quad (6-5)$$

حيث  $\varepsilon$  معدل الطاقة المفقودة من الدقيقة لكل زوج من الإلكترون-الغالب ،  
وأن :

$$N = \frac{E}{\varepsilon} \quad (6-6)$$

حيث  $E$  طاقة الدقيقة الساقطة ، وأن الاستبانة تساوي :

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{E}} \quad (6-7)$$

وفي الواقع العملي فإن أحداث التأين ليست غير معتمدة تماماً على بعضها البعض . والتذبذب في  $N$  أقل من  $\sqrt{N}$  بحوالي الجذر التربيعي لمعامل فانو ( $F$ )  
Fano Factor ( $\sqrt{F}$ ) والذي له قيمة أقل من واحد . أي أن :

$$\Delta E = \varepsilon\sqrt{FN} \quad (6-8)$$

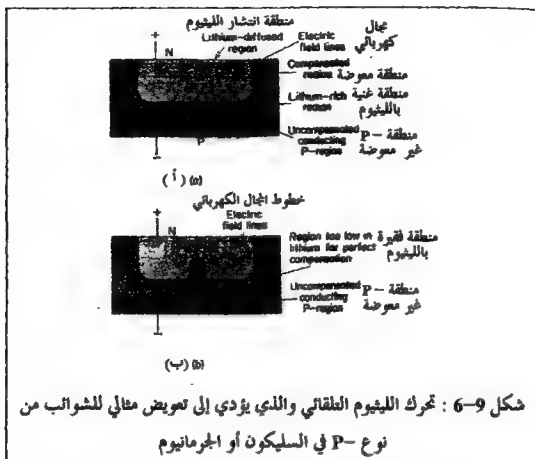
$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\frac{F\varepsilon}{E}} \quad (6-9)$$

أما قيمة  $F$  للسليكون فتساوي حوالي 0.15 ، وأن أفضل عرض قمة يمكن الحصول عليه في الكشف عن 50 MeV من أيونات الهيليوم في عداد السليكون حوالي 5.2 KeV أو 0.0104% من طاقة أيون الهيليوم . ونظراً لوجود عدة مؤثرات صغيرة في السليكون بالإضافة إلى الضجيج في النظام الإلكتروني فإنه من الصعب الحصول على عرض قمة صغير جداً 0.0104% ، والقيمة التي يتم الحصول عليها عملياً 0.04% .

تتاز عدادات السليكون والجermanيوم بالسرعة العالية وباستبانة الطاقة الممتازة وبالتناسب الدقيق لحجم النبضة مع الطاقة المفقودة من قبل الدقيقة في المنطقة المستفدة .

وهذا لا ينطبق على الدقائق التي تسير ببطء كنواذج الانشطار وتحمل شحنة عالية وذلك لإنتاجها كثافة عالية من الإلكترونات والقرب بالقرب من نهاية المدى ، ويحدث أن يعرّض بعضها مرة أخرى قبل أن تتجمع الشحنات مما يؤدي إلى نبضة صغيرة .

تبين المعادلة (3-6) أو (4-6) إمكانية زيادة سمك الطبقة المستفيدة إلى ما لا نهاية من خلال الزيادة في جهد الاستقطاب العكسي . أما واقع الأمر فيقول بعدم إمكانية استخدام جهد أعلى من 1000 فولت . وإذا تعدينا هذه القيمة نجم عن ذلك عطب كهربائي وازداد الضجيج كثيراً في العداد وانخفضت قيمة استبانة الطاقة عن القيمة المحسوبة من المعادلة (9-6) . ويمكن زيادة سمك الطبقة المستفيدة عن ما سبق من خلال بناء العداد من السليكون أو الجرمانيوم المحتوي على تركيز أقل من  $N_p$  (أكثر نقاوة) . ويصل الحد الأعلى للطبقة المستفيدة في المواد التجارية إلى 1 أو 2 ملم . ولدى الطبقة المستفيدة التي يصل سمكها إلى 2 ملم في السليكون القدرة على إيقاف البروتونات حتى 18 MeV . وهناك طريقة فنية تسمح بتقليص  $N_p$  إلى الصفر وتستخدم الليثيوم كعنصر مانع بدلاً من الفسفور . وذلك من خلال تخير كمية صغيرة من الليثيوم على سطح السليكون أو الجرمانيوم من النوع P- . ومن ثم يسخن العداد من أجل أن ينتشر الليثيوم في السطح إلى عمق 0.1 ملم تقريباً . فيصبح العداد صمام ثنائي ويمكن إخضاعه إلى استقطاب عكسي ينجم عنه مجال كهربائي بين السطح الأمامي والخلفي ، فيكون السطح الغني بالليثيوم موجب والآخر سالب . وتتحرك أيونات الليثيوم ببطء عند درجة حرارة 100°م في السليكون و 40°م في الجرمانيوم من الجانب الموجب إلى الجانب السالب معوضة تماماً الذرات المستقبلة في المادة من النوع P- . ويمتاز التعويض الدقيق بخصوصية التنظيم أو الضبط الذاتي .



شكل 6-9 : تحرك الليثيوم العفائي والذي يؤدي إلى تعويض مثالي للشوائب من نوع P- في السليكون أو الجرمانيوم

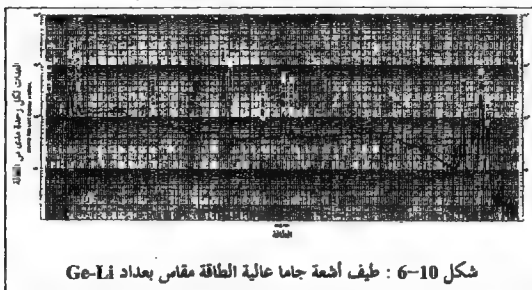
فلو افترضنا أن عند نقطة ما في الحدود الفاصلة بين الليثيوم (المنطقة المعوضة) والمادة غير المعوضة من النوع P، تكونت منطقة غنية جداً بالليثيوم كما في الشكل (أ-6) شحنتها موجبة قليلاً بالمقارنة مع المادة من النوع P في الشكل (8-6). وهذا فإن لأيونات الليثيوم قابلية عالية على التحرك من المنطقة الغنية والعكس صحيح إلى أن ينقص تركيز الليثيوم إلى القيمة المناسبة، أي أن شدة المجال الكهربائي خلف المنطقة الغنية بالليثيوم أقل قليلاً من المناطق الباقية ويستدل على ذلك من الكثافة القليلة لخطوط المجال الكهربائي كما في الشكل (أ-6). وأما إذا كانت الحدود منطقة لا تحوي على العدد الكافي من الليثيوم من أجل التعويض التام ازدادت قوة المجال الكهربائي عند تلك النقطة كما في الشكل (ب-6) وهذا سيؤدي إلى التحرك السريع

لأيونات الليثيوم نحو المنطقة الفقيرة بالليثيوم إلى أن يتم التعويض التام .

ويمكن الحصول على مناطق تعويض بسلك يصل إلى عدة مستقيمات نتيجة لتحرك الليثيوم ولم يتم تصنيع عدادات سليكون سمكها أكثر من 1سم . وذلك لارتباط السلك مع جهد الاستقطاب العكسي والذي يزداد مع ازدياد السلك والحد المعمول به حوالي 1000 فولت تشكل الحد الأعلى لعدادات سليكون من سمك 1سم أو أقل إذا احتجنا إلى استبانة طاقة جيدة .

تتحرك الثقوب والإلكترونات في الجرمانيوم بسرعة تساوي ثلاث أضعاف السرعة في السليكون مما يعني إمكانية استخدام طبقات التعويض السميكة . وتصنع عدادات أشعة جاما بحجم تعوض قد يصل إلى 50سم<sup>3</sup> . وللجرمانيوم فعالية أعلى من السليكون في الكشف عن أشعة جاما وذلك لكبر عدده الذري وذلك لأن الامتصاص الكهروضوئي يزداد مع  $Z^5$  لمادة الماص (الفصل الخامس 2-4-5) وبين الشكل (10-6) طيف جاما من تحليل  $^{56}\text{Co}$  بعدد جرمانيوم-ليثيوم . وتنتج القمم الحادة عن الامتصاص الكامل لطاقة الفوتون من خلال الامتصاص الكهروضوئي أو تشتت كمبتون المتبوع بالامتصاص الكهروضوئي للفوتون المتشتت . وتتجم الخلفية المستمرة في أسفل القمم عن الفوتونات التي تخسر جزء من طاقتها من خلال تشتت كمبتون . وقد تفر فوتونات كمبتون المتشتت وخاصة إذا استخدم عداد بحجم صغير ، مما يعني أن جزء من طاقة الفوتون الساقط سوف تفقد في العداد . وفي حال كانت أشعة جاما الساقطة أكثر من 1.02 MeV ظهرت إمكانية :الامتصاص بإنتاج الأزواج (الزوج) ، كما يبطء الإلكترون والبوزترون أكثر في الجرمانيوم ومن ثم يباد البوزترون (ارجع إلى 5-4-5) بالإلكترون منتجاً فوتونين طاقة كل منهما 0.511 MeV . وإذا تم امتصاص الفوتونات في العداد حصلنا على نبضة مساوية

ل طاقة أشعة جاما الكاملة . وأما إذا امتص أحدهما وفر الآخر حصلنا على نبضة تساوي  $0.511 \text{ MeV}$  ( $E_\gamma$ ) وإذا فر كلاهما حصلنا على نبضة تساوي  $1.022 \text{ MeV}$  ( $E_\gamma$ ) وتؤدي هذه العمليات إلى إنتاج قسم هروب تابعة أحادية وثنائية (يرمز لهما  $SEP$  ,  $DEP$ ) عند  $0.511 \text{ MeV}$  و  $1.022 \text{ MeV}$  على التوالي تحت قمة أشعة جاما ذات الطاقة الكاملة ( $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$ ) .



وتُحسن استجابة الطاقة لكل من عدادات السليكون والجرمانيوم بالتبريد لكل منهما . فالليثيوم يتحرك بسهولة في شبكة الجرمانيوم وإذا اكتملت عملية التحرك وجب إبقاء العداد بارداً بما لا يقل عن حرارة الثلج الجاف وذلك لمنع الانتشار الحراري لليثيوم بحيث لا يفسد التعويض في العداد . وتظهر عدادات الليثيوم والجرمانيوم ذات التعويض التام تياراً صغيراً عند جهد الاستقطاب العكسي . ويؤدي التهييج الحراري في الشبكة إلى انتقال بعض الإلكترونات إلى حزمة التوصيل وخاصة في الجرمانيوم وذلك لقلة الفرق في الطاقة  $0.67 \text{ eV}$  بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ . وينتج عن التذبذب الإحصائي السريع للتيار المتسرب ضجيج

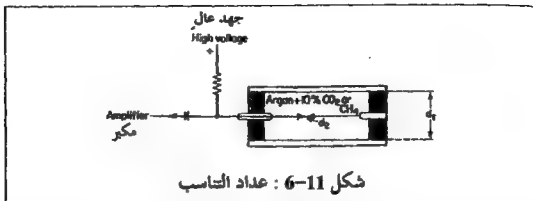
كهربائي يقلل من قوة استبانة الطاقة للعداد . ويمكن التقليل من انتقال الإلكترونات الحرارية إلى حد كبير من خلال التبريد للعداد . فتعمل عدادات السليكون في المدى من 25°م إلى 196°م (غليان النيتروجين السائل) وعدادات الجermanيوم عند 196°م . ويؤدي التبريد إلى التقليل من التيار المتسرب وإلى الزيادة في حركة حاملتي التيار فتتجمع الشحنة الناتجة عن الدققة بسرعة أعلى .

#### 4-6 عدادات التناسب Proportional Counters

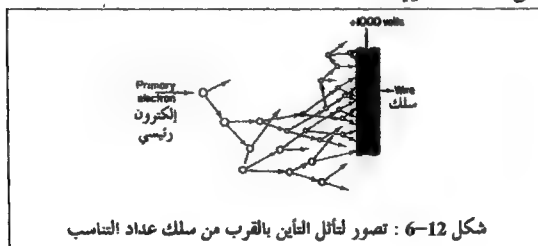
تقوم عدادات التناسب بوظيفتين : أولهما الكشف عن الدقائق وثانيهما التكبير . وتستخدم هذه العدادات في الكشف عن إشعاعات بيتا وجاما .  
فإذا صُنع القطب المجموع للإلكترونات في العدادات المعبئة بالغاز من سلك رفيع قطره 0.001 بوصة ، كان المجال الكهربائي القريب من السلك عالٍ جداً (انظر الشكل 11-6) وتقدر قوة المجال الكهربائي  $E$  على مسافة  $r$  من السلك باستخدام المعادلة التالية (10-6) .

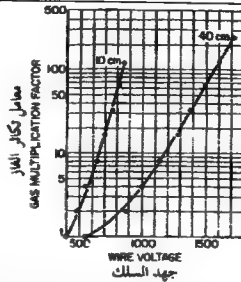
$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)} \quad \frac{\text{فولت}}{\text{سم}} \quad (10-6)$$

حيث ترمز  $V$  لجهد السلك المركزي الموجب بالنسبة للأسطوانة الخارجية و  $d_1$  و  $d_2$  لقطر العداد والسلك على التوالي . فكلما قلت المسافة  $r$  كلما ازداد المجال الكهربائي  $E$  ، ويحدد قطر السلك أصغر قيمة محتملة لـ  $r$  . كما تصل قوة المجال الكهربائي إلى أعلى قيمة لها مباشرة خارج السلك الرفيع وعلى الرغم من ذلك فإن الأسلاك السميكة تعطي قيم أعلى للمجال الكهربائي  $E$  عند قيمة ثابتة للمسافة  $r$  .



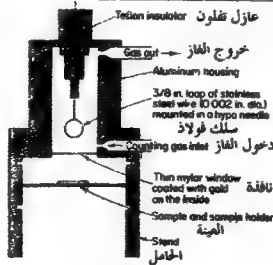
وتمتاز عدادات التناسب بالقيمة العالية للمجال الكهربائي بالقرب من السلك مما يكسب الإلكترونات المتجهة نحو السلك تسارع كافٍ بين الاصطدامات فيستطيع تأيين جزيئات الغاز . وقد يتسبب إلكترون واحد بسيل من الأيونات (تأين) كما هو مبين في الشكل (6-12) . ويحدث معظم التأين (avalanche) بالقرب من السلك وذلك لارتفاع المجال الكهربائي هناك . وتسمى هذه العملية بتكاثر الغاز (gas multiplication) . ويتناسب مقدار النبضة الخارجة مع عدد الإلكترونات الرئيسية ومع الطاقة المفقودة من البقعة ومع معامل تكاثر الغاز (gas multiplication factor) ويعتمد معامل تكاثر الغاز على جهد السلك العالي  $V$  كما هو موضح في الشكل (6-13) . ونحتاج لقياس الطاقة الدقيقة في عداد التناسب إلى جهد عالٍ ثابت جداً وذلك لتثبيت قيمة ثابت تكاثر الغاز ، علماً بإمكانية الحصول على استبانة طاقة تساوي 1% .





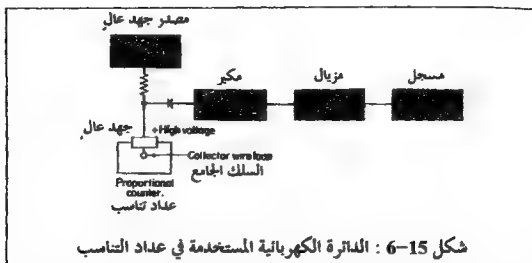
شكل 6-13 : علاقة معامل تكاثر الغاز مع جهد السلك للأرغون عند ضغط 10 و 40 سم زئبق

وتستخدم عدادات التاسب في الكشف والعد لإشعاعات  $\alpha$  ،  $\beta^-$  ،  $\beta^+$  و  $E.C$  الناتجة عن التحللات بغض النظر عن طاقة كل منهم . ويتم ذلك بوضع العينة في داخل العداد ومحب الهواء من خلال الجريان المستمر لغاز كالميثان أو الغاز الطبيعي (كما هو مبين في الشكل 6-14) .

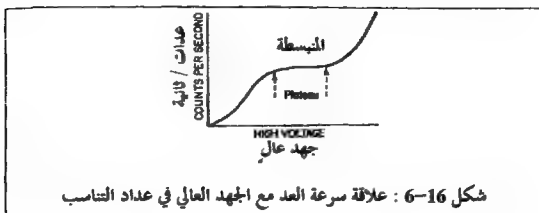


شكل 6-14 : مقطع طولي لعداد التاسب





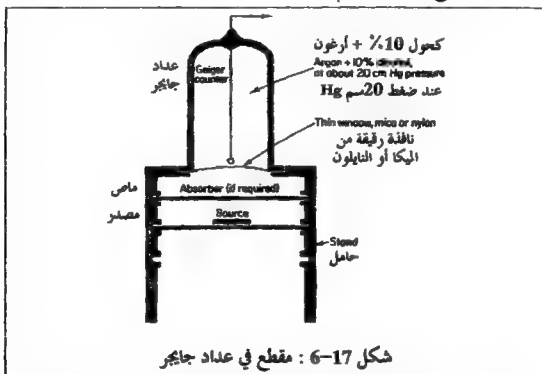
وبين الشكل (15-6) الدائرة الكهربائية المستخدمة والتي تحتوي على مزيال يزيل النبضات التي لا تتعدى جهد معين يمكن تعديله ، أي أنه يرفض النبضات الصغيرة جداً والناجمة عن الضجيج في المكبر ، وهناك أيضاً عداد ومسجل يسجلان عدد النبضات التي تصل . وبما أن للعداد القدرة على كشف ما يقرب من  $10^5$  دقيقة/ثانية استخدم المسجل الإلكتروني بدل الميكانيكي البطيء . ويمكن للمسجل الإلكتروني أن يسجل 999 نبضة ثم يعود للصفر عند وصول النبضة الألف فيرسل نبضة إلى المسجل الميكانيكي الذي يسجل عدد الآلاف التي وصلت . وإذا كانت عيارات المزيال ثابتة وكسب المكبر ثابتة تغيرت سرعة العد كلما ازداد الجهد العالي، كما هو مبين في الشكل (16-6) . ولا تعتمد سرعة العد في المنطقة المنبسطة plateau على قيمة الجهد العالي وذلك لأنه ينتج عن كل دقيقة داخلة إلى العداد نبضة كبيرة تتعدى المزيال . وأما إذا ازداد الجهد ازدادت سرعة العد مرة أخرى بسبب التأثيرات المختلفة التي تنتج عداات مزيفة .



## 5-6 عدادات جايجر Geiger Counters

تعتبر عدادات جايجر من أقدم الأجهزة المستخدمة في العد وأقلها إرضاءً . وهناك أوجه شبه كثيرة بين عدادات جايجر وعدادات التناسب والاختلاف الرئيسي هو في المجال الكهربائي القريب من السلك ذو القيمة العالية مما يؤدي إلى انتشار التأثر للإلكترونات وللايونات الموجبة فوق السلك كله وإنتاج نبضة ما بين 20-100 فولت . ولابد من اتخاذ بعض الاحتياطات لمنع تحول التأثر إلى تفريغ كهربائي مستمر . وإذا عادت الأيونات الموجبة والتحدت مع الإلكترونات كما هو متوقع مستطلق الفوتونات التي قد تصطدم مع جدران العداد مطلقة إلكترونات ضوئية تسبب بالتأثر من جديد . ويمكن التقليل من هذا التأثير من خلال إضافة غاز معدن الفلزات أو بخار إلى الأرجون ، والمخاليط المستخدمة هي  $90\% \text{ Ar} + 10\% \text{ كحول إيثيلي}$  أو أرجون مع ضغط 0.20 ملم Hg من الكلورين . فتأخذ أيونات الأرجون الموجبة الإلكترونات من جزيئات الكحول لتعادل شحنتها ، بعد ذلك تتحرك أيونات الكحول ببطء مبتعدة عن السلك ونحو حائط العداد لتتحد مع الإلكترونات من الحائط فيتسبج عن ذلك طاقة الاتحاد الكافية لتحليل الكحول بدلاً من انطلاق إلكترونات جديدة . وبهذه الطريقة يمنع التأثر من التواصل

الذاتي. وعيب عداد جايجر بطئه الكبير بالمقارنة مع عداد التاسب ، فبعد الكشف عن الدقيقة يحاط السلك كله بطبقة من الأيونات الموجبة التي تقلل من قوة المجال الكهربائي . وقد يؤدي هذا لعدم الكشف عن أي دقيقة تصل السلك قبل رحيل الأيونات الموجبة مبعدة عنه ، وتحتاج هذه العملية لحوالي  $10^{-3}$  ثانية . كما أنه من غير المريح وضع المصدر المشع في داخل العداد ، علماً بأن دخول الدقائق يتم من خلال نافذة رقيقة من المايكا أو النايون (الشكل 6-17) . ويحوي الحامل في الشكل (6-17) على عدة رفوف لدعم أو سد المصدر المشع أو أي ماص يتم استخدامه .



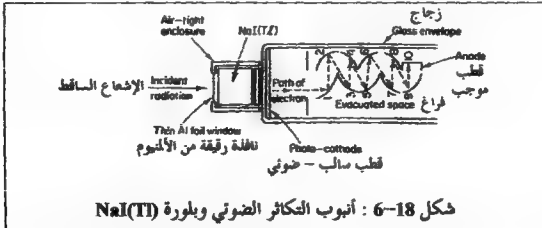
ويتميز عداد جايجر بإنتاجه نبضة كبيرة تحتاج للقليل من التكبير ولا يعتمد حجم النبضة على طبيعة الإشعاع الساقط . وتعتبر عدادات جايجر من العدادات البسيطة والرخيصة الثمن ولهذا تستخدم كأجهزة متقلة في مسح المختبرات للكشف عن التلوثات الإشعاعية وفي التنقيب عن المعادن .

## 6-6 عدادات الوميض Scintillation Counters

تصنف العدادات المملوءة بالغاز على أنها غير حساسة لأشعة إكس وجاما . وذلك لأن احتمالية إنتاج الإكرون من فوتون ذو طاقة عالية في داخل العداد قليلة جداً . وعلى الرغم من أن العدادات شبه الموصلية وخاصة الجرمانيوم ذات فعالية عالية واستبانة طاقة ممتازة إلا أنه لا يمكن تصنيعها بحجم كبير جداً . ولقد وجد العلماء أن عداد وميض يوديد الصوديوم (NaI) ذا فعالية عالية في إيقاف أشعة جاما ذات الطاقة العالية ، كما يمكن تصنيعها بحجم أكبر من عدادات الجرمانيوم وتمتاز باحتوائها على عنصر اليود الذي له عدد ذري أكبر من الجرمانيوم . إلا أنها ذات استبانة طاقة رديئة . ولهذا فإن عدادات وميض يوديد الصوديوم مستخدمة في الحالات التي تستدعي فعالية عالية في الكشف .

يتكون العداد من بلورة واحدة من NaI تما من الملح المصهور . وقد يصل قطرها إلى 10 بوصات وطولها أيضاً ، إلا أن البلورات الصغيرة هي المستعملة . ويحتوي يوديد الصوديوم على حوالي 0.5 مول٪ من يوديم الثاليوم النشط . وتؤدي الإشعاعات المؤينة إلى انطلاق وميض قصير من الضوء طول موجته ما بين  $3300-5000 \text{ \AA}$  . ويتم الكشف عن وميض الضوء بواسطة أنابيب التكاثر الضوئي التي تعطي نبضات كهربائية مسحتها عدة فولتات . وبين الشكل (18-6) جميع التفاصيل ، وبما أن بلورة يوديد الصوديوم عازلة جداً للماء وجب وضعها في علبة محكمة الإغلاق لا تسمح بدخول الهواء ولها طاقة دخول رقيقة من الأنيوم سمكها 0.001 بوصة . ويمر الضوء للطلق في البلورة عبر طاقة شفافة في خلف البلورة إلى أنبوب التكاثر الضوئي . كما تغطي جدران العلبة الداخلية بأكسيد المغنيسيوم الذي يقوم بوظيفة عاكس للضوء . وتثبت العلبة على مقعدة الأبواب بطبقة رقيقة وشفافة من الزيت أو الشحم وظيفتها توصيل الضوئي الجيد والتقليل من الاحتكاكات الداخلية .

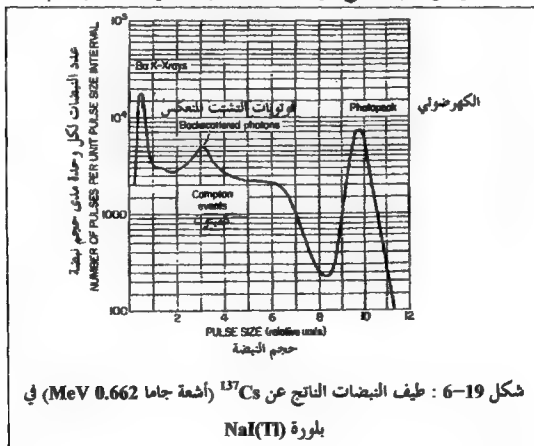
ويتكون سطح الكاثود الضوئي في أنبوب التكاثر الضوئي من صفيحة شبه شفافة من مسيكة الأتوموني والسيزيوم تطلق إلكترونات ضوئية بفعالية عالية عندما تصطدم بها الفوتونات من بلورة يوديد الصوديوم . وتسارع هذه الإلكترونات نحو القطب الموجب (الأنود) رقم واحد (1) . ويصنع سطح القطب الموجب من صفيحة من الأتوموني والسيزيوم أو من المنيسيوم والفضة . وهذه الصفائح قادرة عالية على إطلاق عدة إلكترونات ذات طاقة قليلة مقابل كل إلكترون يسقط عليها . ويضع هذا تسارع الإلكترونات الثانوية نحو الأنود الثاني الذي له جهد موجب أعلى وتكرر هذه العملية . أي أن عدد الإلكترونات الواصل للأنود الأخير يفوق بكثير عدد الإلكترونات الأصلي . فعلى سبيل المثال : إذا كان عدد الإلكترونات المنطلقة من كل أنود  $n$  ضعف عدد الإلكترونات الساقطة وكان هناك تسع مراحل في الأنبوب ، تكاثرت الإلكترونات بـ  $n^9$  ، وإذا كانت  $n = 4$  ، فإن عدد الإلكترونات الكلي في النهاية  $2.6 \times 10^5$  . وكان أنبوب التكاثر الضوئي مكرر له كسب عالي جداً . ويثار الكسب كثيراً بالجهود المطبق في الأقطاب الموجبة لاعتماد التكاثر على الجهد ، فقد لا يحدث أو يكون قليلاً إذا لم تسارع الإلكترونات بما فيه الكفاية من مرحلة إلى أخرى . وإذا استخدم جهد كلي يساوي 2000 فولت نتج عن ذلك نبضات من عدة فولتات تحتاج إلى القليل من التكبير .



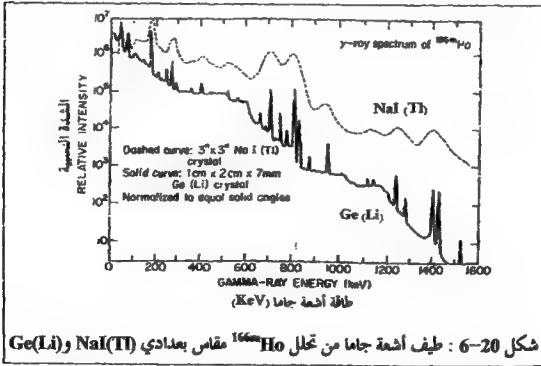
شكل 18-6 : أنبوب التكاثر الضوئي وبلورة NaI(Tl)

ويتناسب حجم النبضة الخارجة طردياً مع الطاقة المفقودة من قبل الدقيقة

الساقطة ، ولهذا تستخدم بلورات NaI (Tl) في قياس طاقة الدقائق وفي الكشف عنها . وقد تبلغ سرعة العد  $10^5$  ثانية لأن وميض الضوء يتم في وقت قصير جداً بعد وصول الإشعاع . ويستخدم عداد NaI (Tl) كثيراً في دراسة طيف أشعة جاما لأن له قدرة إيقاف عالية ومهمة . وينجم عن تفاعل أشعة جاما مع البلورة إلكترونات سريعة . وإذا كانت البلورة كبيرة بما فيه الكفاية امتصت هذه الإلكترونات منتجة وميض من الضوء . أما إذا أدى التفاعل الرئيسي إلى إنتاج الإلكترونات ضوئية فإن طاقة أشعة جاما الكاملة سيتم امتصاصها . وفي حال نجم الإلكترون الرئيسي عن تشتت كمبتون فلن يكون لديه الطاقة الكاملة لأشعة جاما . وغالباً ما تهرب أشعة جاما المشتتة من البلورة فيتم امتصاص جزء من الأشعة الساقطة من قبل البلورة وينتج عن ذلك نبضة صغيرة كما في عداد الجرمانيوم .



وبين الشكل (19-6) طيف النبضات الناتجة من إشعاعات جاما في  $^{137}\text{Cs}$ . وتتكون أكبر هذه النبضات من الامتصاص الكهروضوئي وتستخدم هذه القمة في قياس طاقة أشعة جاما. وتؤدي تأثيرات كمتون إلى توزيع منبسط فوق قمة صغيرة ومصدرها أشعة جاما المشتتة من حجاب الرصاص المحيط بالعداد. كما تظهر قمة في منطقة النبضات ذات الحجم القليل مصدرها أشعة  $\text{K}_\alpha$  إكس للباريوم الناتج من تحلل  $^{137}\text{Cs}$ . ويزداد حجم القمة الضوئية كلما ازداد حجم البلورة لزيادة فرص التفاعل ما بين أشعة جاما كمتون المشتتة والبلورة مرة ثانية وبميت تفقد طاقتها الباقية قبل أن تهرب من البلورة. وتتناسب استبانة الطاقة (عرض القمة الضوئية عند منتصف الارتفاع) عكسياً مع الجذر التربيعي لطاقة أشعة جاما. فإذا كانت طاقة جاما 1 MeV كانت الاستبانة 8%.



شكل 20-6 : طيف أشعة جاما من تحلل  $^{166}\text{Ho}$  مقاس بعدادي  $\text{NaI(Tl)}$  و  $\text{Ge(Li)}$

وبين الشكل (20-6) مقارنة ما بين طيف أشعة جاما لـ  $^{166}\text{Ho}$  المقاسة

بعدادي NaI و Ge من نفس الحجم . ونلاحظ أن استبانة الطاقة للقمم الضوئية أفضل بكثير في عداد Ge . وقد تم توحيد المنحنيين من العدادين للحصول على نفس الرقم من الأحداث عند نفس الفعالية . وفي واقع الأمر يسجل عداد NaI ما بين 10 إلى مئة ضعف من الأحداث بالمقارنة مع Ge وذلك لأنه يحتوي على اليود الذي له عدد ذري أعلى مما يجعل منه ماص فعال لأشعة جاما .

ونظراً لقصر زمن وميض الضوء في البلورات العضوية كالستلين Stilbene والأنثراسين Anthracene بالمقارنة مع (TI) NaI ، استخدمت هذه البلورات في الكشف عن الدقائق المشحونة وفي العد خاصة عندما نحتاج إلى سرعة عالية في العد. ويقدر زمن وميض الضوء فيها بحوالي  $10^{-8}$  ثانية . ولا يمكن استخدامها في قياس أشعة جاما لاحتوائها على عناصر خفيفة مثل الكربون والهيدروجين . ويتناسب الضوء الناتج مع الطاقة المفقودة من الدقيقة المؤينة في حال كانت كثافة التأين قليلة بما فيه الكفاية . وتستخدم البلورات العضوية عند الكشف عن الدقائق في التجارب وخاصة عندما تكون الاستجابة السريعة أهم من استبانة الطاقة الجيدة. كما أن استخدامها في قياس الطاقة الكلية للدقائق الثقيلة محدود لأن كثافة التأين عالية جداً لتعطي نبضة تتناسب بدقة مع الطاقة إلا إذا كانت سرعة الدقيقة عالية جداً ( $v_p < 100 \text{ MeV}$ ) . عند ذلك تمر الدقيقة عبر بلورة من الحجم العملي ويتم قياس الطاقة المفقودة بدلاً من الطاقة الكلية .

ويمكن استخدام المواد العضوية المطلقة للوميض في المواد البلاستيكية الشفافة المصنعة بأشكال مختلفة . كما يمكن إذابتها في السوائل العضوية فعضطي كواشف ذات أحجام كبيرة . وقد استخدمت هذه المحاليل في الكشف عن النيوترون .



## الأ، سئلة :

1 ( احسب كمية الشحنة السالبة بالكولوم الناتجة عن إيقاف  $10 \text{ MeV}$  ديوترون في السليكون . وإذا مرت هذه الشحنة بسرعة ثابتة في مقاومة  $10^6$  أوم ، ريزمن  $1 \mu\text{sec}$  ، فما هو الجهد المتولد .

(2) إذا كانت الطبقة المستفلة في كاشف السليكون سميكة بما فيه الكفاية لإيقاف  $1 \text{ MeV}$  أيونات هيليوم وكان جهد الاستقطاب  $50$  فولت ، فاحسب سمك الطبقة الكافي لإيقاف  $15 \text{ MeV}$  أيونات هيليوم . افترض أن العلاقة ما بين الطاقة والمدى للسليكون مساوية للألنيوم وأن سمك الطبقة في الجانب المانع من الوصلة قليل جداً .

(3) احسب للكاشف في السؤال (2) ارتفاع النبضة الناتجة عن  $10 \text{ MeV}$  بروتون بالمقارنة مع النبضة الناتجة عن  $10 \text{ MeV}$  أيون هيليوم عندما يكون جهد الاستقطاب  $75$  فولت .

(4) ارسم للكاشف في السؤال (3) العلاقة ما بين ارتفاع النبضة النسبي لأيونات الهيليوم مع طاقة هذه الأيونات من  $1 \text{ eV}$  إلى  $14 \text{ MeV}$  علماً بأن جهد الاستقطاب  $50$  فولت .



## الفصل السابع

### استخدامات النظائر المشعة في الكيمياء

### RADIOCHEMICAL APPLICATIONS

#### 7-1 مقدمة

تستخدم النظائر المشعة في الوقت الحاضر من قبل العديد من العلماء في أبحاثهم ودراساتهم أكانوا علماء نوويين أم لا . وتعتبر ظاهرة النشاط الإشعاعي لغير النوويين أداة تساعدهم في أبحاثهم كمطياف الكتلة أو جهاز قياس درجة الحموضة . ويستخدم العلماء النوويون الأساليب الكيميائية في دراسة الظواهر النووية وأما الكيميائيون الإشعاعيون فيستخدمون الأساليب النووية في دراسة الظواهر الكيميائية . سندرس في هذا الفصل الطرق التي تم استخدام الكيمياء الإشعاعية فيها لدعم البحث في شتى مجالات الكيمياء والعلوم التي تتصل فيها .

في عام 1913 قام العالمان ج.دي. هيفزي و ف.بانث بتجربة للدراسة ذاتية أحد أملاح الرصاص مستخدمين أحد نظائر الرصاص المشعة والموجودة في الطبيعة وبتركيز ضئيل . وبعد اكتشاف النظائر المصنعة ، قام العالمان دي. هيفزي و أو.شسويتز بتحضير  $^{32}\text{P}$  المشع واستخدامه بتركيز ضئيل في الدراسات البيولوجية (الحياتية) .

وفي نفس العام أجرى دي. هيفزي وآخرون أول تحليل بالتشيط (تشيطي) على العناصر النادرة . وعلى الرغم من أهمية استخدام العناصر المشعة بتركيز ضئيل إلا أنها لم تستخدم على نطاق واسع إلا بعد الحرب العالمية الثانية لتوفر كميات كبيرة من العناصر المشعة من المفاعلات النووية .

إن استخدام النظائر المشعة في الدراسات أقل ثمناً وأسهل من استخدام النظائر المستقرة غير المشعة . نظراً لحاجة النظائر المستقرة إلى أجهزة مكلفة الثمن مثل جهاز مطياف الكتلة وجهاز الرنين المغناطيسي وغيرها .

## 2-7 الافتراضات الأساسية لاستخدام النظائر المشعة بتركيز شحيح

### 'Basic Assumptions for Tracer Use

هناك بعض التجارب التي لا يمكن الحصول منها على نتائج علمية إلا باستخدام العناصر المشعة الشحيحة لتستدل منها على وجود وتركيز عناصر أو مركبات معينة في مكان معين وزمن محدد . ومن الأمثلة على ذلك دراسة انتشار أيونات معدن في محاليل أملاح ذلك المعدن .

أما الافتراض الأول فهو أن للنظائر المشعة والمستقرة لعنصر ما نفس الخواص الكيميائية ، فإذا استبدلنا  $^{12}\text{C}$  بـ  $^{14}\text{C}$  في مركب للكربون فلن تتغير نوعية وقوة الروابط الكيميائية ولن تتأثر الخواص الفيزيائية لذلك المركب . وتعمد صحة هذا الافتراض على دقة قياس الخواص الفيزيائية والكيميائية . وقد تتأثر هذه الخواص بالفروق في الكتلة بين النظائر ، وفي حال  $^{14}\text{C}$  و  $^{12}\text{C}$  فإن الفرق في الكتلة حوالي 15% ، ولهذا فإن تأثير النظر *Isotope Effect* قليل ومن الصعب الكشف عنه ، وفي العناصر الثقيلة يهمل تماماً ، ولا يأخذ تأثير النظر بعين الاعتبار إلا في الحالات التي يستبدل فيها الهيدروجين -الديوتريوم- والريتيوم .

وأما الافتراض الثاني فهو عدم تأثر الخواص الكيميائية والفيزيائية للنظير بطبيعته المشعة . فلا يمكن التمييز بين ذرة النظير المشع والمستقر إلا من خلال كتلة النظير ، وعندما تتحلل ذرة النظير المشع ويتم عليها إنتاج عنصر جديد له خواص كيميائية خاصة به . وفي حال كانت سرعة التحلل عالية جداً ظهرت إمكانية حدوث تأثيرات إشعاعية ثانوية بسبب طاقة التحلل الإشعاعي المنطلقة . ويستخدم في التجارب مستوى عالي من النشاط الإشعاعي ليعطي نتائج دقيقة ولا يؤدي إلى تأثيرات إشعاعية ملحوظة . وعلى الرغم من الافتراض القائل بعدم تأثر الأنظمة الكيميائية بالنشاط

الإشعاعي للنظائر وجب علينا أن نعطي العلاقة بين الأب والإبنة في النوى المشعة عناية خاصة . فعلى سبيل المثال Sr و Y عنصران مختلفان كيميائياً ، وإذا أخذنا عينة من  $^{90}\text{Sr}$  وقسنا عدد دقائق  $\beta$  الكلي لها ، فإن هذه العينة تحتوي على  $^{90}\text{Sr}$  وجزء مجهول من  $^{90}\text{Y}$  المشع الناتج من تحلل  $^{90}\text{Sr}$  الإشعاعي حسب العلاقة التالية.



ويستخدم لقياس امتصاص  $\beta$  ووميض جاما والتي تعتمد على الفروق في الطاقة في دراسة هذا النوع من حالات الأب والإبنة . وإذا كان الاتزان بين نشاط الأب والإبنة سريع كان من الأبسط عد العينة بعد زمن كاف يسمح بالوصول إلى الاتزان . وفي حالة  $^{90}\text{Sr} \sim ^{90}\text{Y}$  فإن الزمن الكافي للوصول إلى التزان هو 25 يوم. وإذا استخدمنا  $^{137}\text{Cs}$  في دراسة كيمياء السيزيوم وجب علينا الانتظار من 15-20 دقيقة فقط مباشرة بعد الفصل لعد العينة وهذا الزمن كاف بحيث تصل الإبنة  $^{137}\text{Ba}$  (2.6 دقيقة =  $t_{1/2}$ ) إلى مستوى الاتزان . وبما أن نسبة  $^{137}\text{Cs}$  إلى  $^{137}\text{Ba}$  ثابتة في جميع العينات عند الاتزان فإن سرعة العد الكلية قبل وبعد أي خطوة كيميائية هي المقياس الحقيقي لتصرف السيزيوم فقط . وفي حال لم يصل الاتزان الإشعاعي في وقت مناسب فإنه من الضروري أن نميز ضد النشاط الإشعاعي الذي لم يدخل في النظام الكيميائي أو نأخذ بعين الاعتبار إسهامه في سرعة العد الصافية.

وإذا اضطررنا لاستخدام نوى مشعة يمكن أن تتحلل بقلو كاف خلال العمليات الكيميائية وطلب منا أن نقارن بين النتائج عند نقاط مختلفة في التفاعل وجب علينا تصحيح كل نتائج العد إلى نفس النقطة في الزمن .

ومن فوائد استخدام النظائر المشعة بتركيز ضحيح ما يلي :

أ ) يمكن قياسها وكشفها بدقة عالية من  $10^{-6}$  إلى  $10^{-16}$  غم .

ب) لا يعتمد النشاط الإشعاعي على الضغط أو درجة الحرارة أو حالة المادة الكيميائية أو الفيزيائية .

ج) لا تؤثر العناصر المشعة على النظام وتستخدم غالباً في الطرق أو العمليات غير الهدامة .

د) وإذا كان العنصر المشع الشحيح نقي كيميائياً وإشعاعياً فلن يكون هناك تداخل من العناصر الأخرى كما يحدث في التحاليل الكيميائية .

## 7-3 الكيمياء التحليلية Analytical Chemistry

### 7-3-1 طريقة تخفيف النظائر

#### Isotope Dilution Method

تستخدم هذه الطريقة عندما يكون هناك مخاليط معقدة من المركبات مثل تحضير المركبات العضوية وأنظمة الكيمياء الحيوية ويصعب فصل أو تحديد كمية مادة معينة . فيضاف كمية صغيرة نقية كيميائياً وإشعاعياً من تلك المادة إلى المخلول المراد تحليله . وقد تكون هذه الكمية من عنصر أو مركب موسوم معروف النشاط النوعي له . وبعد التأكد من أن المادة المضافة قد خلطت جيداً مع مكونات الخليط السابق ، تفصل من الخليط كمية صغيرة نقية جداً من المادة المراد تحليلها ، ومن ثم توزن ويتم عدّها أو قياس النشاط الإشعاعي لها لحساب نشاطها النوعي . وتحسب كتلة المادة المرادة  $W_0$  في الخليط الأصلي من المعادلة التالية (7-1) :

$$W_0 = \left( \frac{S_0}{S_m} - 1 \right) W_m \quad (7-1)$$

حيث  $W_0$  كتلة المادة المشعة المضافة و  $S_0$  النشاط النوعي لها و  $S_m$  النشاط النوعي للعينه التي تم فصلها مقاساً بنفس الطريقة . ويعرف النشاط النوعي  $S$  بأنه حاصل قسمة النشاط الإشعاعي  $A$  على الكتلة  $W$  ،  $S = \frac{A}{W}$  (dps/غم) (تحلل/ثانية/غم) .

ونفرض للتبسيط ، أننا أضفنا 1.0 غم من  $KNO_3$  بحوي على كمية صغيرة من نظير البوتاسيوم المشع  $K^{40}$  إلى مخلوط من  $KNO_3$  و  $NaCl$  . فإذا فصلت كمية من  $KNO_3$  بالتبلور التجزيئي ووجد أن النشاط النوعي للعينة المقصولة يساوي 1% من النشاط النوعي لعينة  $KNO_3$  الخشوية على  $K^{40}$  الذي أضيف في البدء ، فإن معنى ذلك أن 99% من النشاط النوعي قد بقي في المخلوط . وهذا يدل على أنه عند إضافة العينة الكاشفة ، كانت نسبتها إلى كمية  $KNO_3$  التي لا يوجد فيها نظير مشع كنسبة 99:1 . وبذلك فإن كمية  $KNO_3$  في الخليط الأصلي تساوي 99 غم . وتستخدم هذه الطريقة في الحالات التي يكون فيها الفصل الكمي غير ممكن ، كما في تقدير كميات الرصاص القليلة جداً بالترسيب الأتودي والتي أعطت نتائج مختلفة . فإذا أضفنا كمية معروفة من الرصاص المشع ومن ثم قسنا النشاط الإشعاعي للرصاص على الأتود ، استطعنا تقدير مردود الراسب بالرغم من عدم فعالية الترسيب الكهربائي .

وتستخدم هذه الطريقة في تقدير النافثالين في القار وفي تقدير كمية الأحماض الأمينية في المواد البيولوجية .

وفي حال لم نجد نظير مشع لعنصر ما ، فإنه بالإمكان استخدام هذه الطريقة ولكن من خلال زيادة تركيز نظير مستقر وتحليل العينة بواسطة جهاز مطياف الكتلة . وقام كل من جـ. روزيكا و جـ. ستاري بتطوير طريقة للتحليل الإشعاعي مبنية على تخفيف النظائر ، فنفرض أن هناك حاجة لتقدير كمية صغيرة من أيونات الفضة في محلول مائي ( $W_a$ ) ، فيضاف كمية مساوية لـ  $W_b$  من النظير المشع  $Ag^{110}$  ( $W_b$ ) ، ومن ثم يستخلص الفضة بواسطة الديشيزون الذائب في الكلوروفورم ويحدد النشاط النوعي لهذا المخلوط ( $S_m$ ) . وفي نفس الوقت يتم الاستخلاص لعينة مرجعية بواسطة الديشيزون في الكلوروفورم تحوي على  $W_0$  من النظير المشع النقي لها نشاط نوعي ( $S_0$ ) . والشرط الوحيد في هذه التجربة أن لا تكون كمية الديشيزون كافية لاستخلاص كل

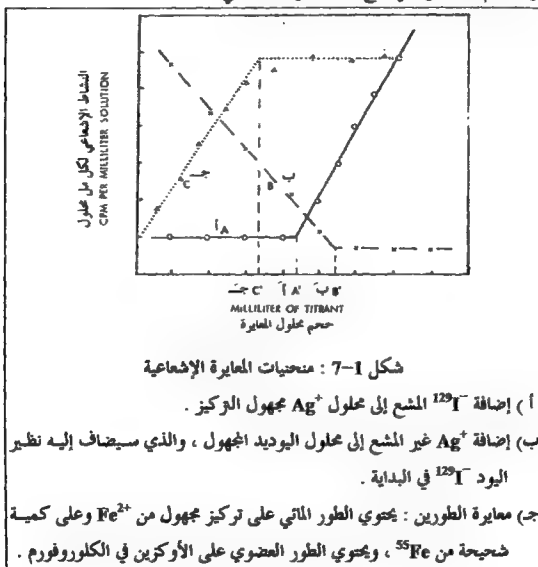
القضة Substoichiometric ، وتستخدم المعادلة (7-1) في تحديد كمية  $W_0$  .  
ومن التطبيقات الأخرى ما يسمى بالمسح المناعي Immunoassay والتي طورها روزلين يالو وتستخدم بشكل واسع في تحليل البروتين في المستشفيات .  
وتشتمل على الخطوات التالية : تضاف كتلة معروفة  $W_0$  من البروتين الموسوم  $P^*$  ويسمح لها بالتفاعل مع كتلة أصغر بكثير من الجسم المضاد A مكونة المعقد PA .  
ومن ثم يتم فصله وتحديد نشاطه الإشعاعي  $R_0$  . وفي نفس الوقت وتحت نفس الظروف يتم خلط كتلة مجهولة  $W_0$  من البروتين مع نفس الكمية  $W_0$  من البروتين الموسوم ، ومن ثم يسمح لها بالتفاعل مع نفس الكمية من الجسم المضاد A لتكون المعقد  $P^*A$  الذي يفصل (كتلته  $W_0$ ) ويقاس نشاطه الإشعاعي  $R_0$  .  
وفي النهاية تحسب الكتلة المجهولة  $W_0$  من المعادلة (7-1) . وتستخدم هذه الطريقة في قياس حجم الدم في جسم الإنسان ، وذلك بحقن حجم معروف من نظير مشع  $^{51}Cr$  ، وبعد أن يختلط جيداً بالدم ، يؤخذ من دم الشخص حجم مساوٍ وتقاس فيه كمية النظير المشع  $^{51}Cr$  ، ومن الكميات المقاسة عن مستوى الإشعاع بحسب حجم الدم . وتستخدم أيضاً في قياس حجم الدم لبقية الحيوانات وفي قياس حجوم المياه الجوفية .

## 2-3-7 طريقة قياس الإشعاع Radiometric Method

وتشتمل هذه الطريقة كل عمليات قياس التركيز بواسطة النظائر المشعة الشحيحة .  
وأحد هذه العمليات هي عملية معايرة حائتين من المادة بوجود نظير مشع . ويستدل على نقطة النهاية من خلال اختفاء النظير المشع من إحدى الحائتين . ومن الممكن القيام بعملية تحليل سريعة لأنظمة غير عضوية وذلك بإضافة كمية فائضة قليلاً من محلول مشع إلى محلول مجهول مما يؤدي إلى الترسب الكمي للمادة الأخيرة المجهولة . فلنفترض أن أحد ما نرغب في تقدير تركيز  $Ag^+$  في المحلول بواسطة المعايرة مع محلول NaI . فإذا استوى محلول NaI على اليود المشع ظهر الإشعاع في الراسب AgI ولن تظهر الإشعاعات في المحلول إلا بعد أن ترسب كل



أيونات  $Ag^+$  من اخلول . وإذا ربحنا العلاقة ما بين النشاط الإشعاعي القياس للمخلول ضد حجم مخلول المعايرة حصلنا على المنحنى (أ) (شكل 1-7) . أما إذا كان تركيز اليوديد هو المجهول ، فضيف اليود المشع بتركيز شحيح إلى مخلول اليود الذي سيعاير لاحقاً مع أيونات  $Ag^+$  ومنحصل على المنحنى (ب) (شكل 1-7) . وفي كلا المنحنيين يمثل تقاطع المنحنى مع محور (س) نقطة النهاية في عملية المعايرة والتي تعطي مباشرة تركيز اخلول المجهول . وتستخدم هذه الطريقة في جميع حالات الترسيب الكمي .



واستخدم بعض العلماء هذه الطريقة في الأنظمة التي تحتوي على سائل-سائل (طورين) ، كما في عملية تقدير تركيز  $Fe^{2+}$  في الماء ، والتي تتم من خلال إضافة كمية شحيحة من  $Fe^{2+}$  المشع إلى المحلول الذي تعدل درجة حموضته بعد ذلك إلى  $pH = 2.0$  . ومن ثم يضاف حجم من الكلوروفورم إلى هذا المحلول فيصبح لدينا سائلين متلامسين ، بعد ذلك تبدأ عملية المعايرة لهذا النظام المتنوع مع محلول الأوكزين في الكلوروفورم . يتكون خلال المعايرة معقد الحديد-الأوكزين الذي يستخلص إلى السائل العضوي مباشرة حاملاً معه النشاط الإشعاعي . ويتبع النشاط الإشعاعي للمحلول المائي المنحني (B) وللمحلول العضوي المنحني (C) (شكل 1-7) . وإذا استخلص كل  $Fe^{2+}$  إلى السائل العضوي ، وصل النشاط الإشعاعي له إلى قيمة ثابتة لا تتأثر بإضافة المزيد من الأوكزين إلى النظام . وتسمح هذه الطريقة بتقدير كميات صغيرة جداً تصل إلى  $10^{-8}$  جـ (M) ويخطأ لا يتعدى 2-3٪ . وقد تستخدم الراتنج الموجب أو السالب في مكان المذيب العضوي ليقوم بعملية الاستخلاص . وهذه الطريقة فائدة كبيرة في طرق التحليل العادية التي تواجه صعوبات بسبب طبيعة الراسب ، كما يمكن أن تتحول إلى طريقة آلية ذات فوائد عديدة .

### 3-3-7 طريقة التنشيط Activation Analysis

تتمتع طريقة التحليل بالتنشيط بحساسية عالية فهي غير هدامة وتستخدم في التقدير الوصفي والكمي للمكونات الذرية لأي عينة . فهي تشغل بديل بسيط وسهل لطرق التحليل الهدامة المعروفة ، ومن العينات التي يمكن دراسة مكوناتها الذرية بسهولة : خامات المعادن والعينات البيئية والبيولوجية والقطع الأثرية

وغيرها. وتحتاج هذه الطريقة إلى مصدر إشعاع قوي لا يمكن الاستغناء عنه .  
وتستخدم في هذه الطريقة خواص التحلل الإشعاعي كنصف العمر  
وطريقة التحلل و طاقة التحلل في التعرف على النوى الموجودة . وتتم هذه  
الطريقة من خلال تشعيع العينة لتكوين كمية R من النواة المشعة حسب  
العلاقة التالية :

$$R = \psi \phi \sigma N (1 - e^{-\lambda t_{irr}}) e^{-\lambda t_{cool}} \quad (7-2)$$

( $t_{irr}$  زمن التبريد و  $t_{cool}$  زمن التشعيع و N عدد ذرات العينة المقنوفة)  
وتجري عملية التشعيع بواسطة فيض من الدقائق المتجانسة كما في  
النيوترونات في المفاعلات (التحليل بالتشعيط النيوتروني ،  
Neutron Activation Analysis NAA) ، وهي من أكثر الطرق  
شيوعاً .

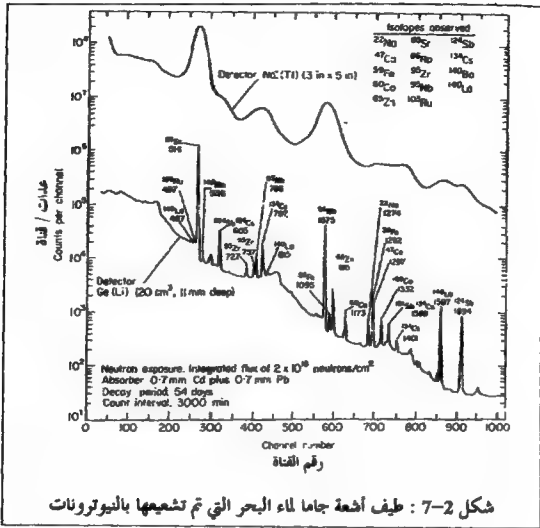
وترتبط أقل كمية من العنصر يمكن الكشف عنها مع حساسية جهاز القياس  
 $\psi$  وفيض الدقائق المقنوفة  $\phi$  والمقطع المستعرض للتفاعل  $\sigma$  وزمن التشعيع  $t_{irr}$   
(اللازم للوصول إلى حد الإشعاع في النشاط) وثابت التحلل للنوى المشعة التكونية  
 $\lambda$  . ويلخص الجدول (7-1) حدود الكشف في NAA .

وهناك بعض العناصر (كالعناصر الخفيفة) التي لها حساسية قليلة نحو  
القذف بالنيوترونات الحرارية ولهذا تستخدم النيوترونات السريعة (FNNA)  
أو الدقائق المشحونة (CPAA) في تشعيها . فتم عملية تحليل الأوكسجين  
بالتشعيع بنيوترونات طاقتها 14 MeV ( $\sigma = 37 \text{ mb}$ ) فينتج  $^{16}\text{N}$  الذي  
يتحلل (ثانية  $t_{1/2} = 7.3$ ) مطلقاً دقائق  $\beta$  وأشعة جاما (6-7 MeV) . ويبين  
الشكل (7-2) طيف NAA نموذجي تم الحصول عليه من جهاز متعدد

الفتوات مرتبط بكاشف الوميض (المنحني الأعلى) أو بكاشف الحالة الصلبة (المنحني الأسفل) . ويمكن تحديد طاقة  $\gamma$  لكل قمة من أجل التعرف على كل نواة . وتتزامن هذه العملية مع التعرف بواسطة كواشف الحالة الصلبة فقط ، فكواشف الوميض NaI(Tl) لا تستطيع ذلك لضعف الاستبانة فيها .

حدود الكشف	العناصر Elements
Limit of detection ( $\mu\text{g}$ )	
$1-3 \times 10^{-8}$	Dy
$4-9 \times 10^{-6}$	Mn
$1-3 \times 10^{-5}$	Kr, Rh, In, Eu, Ho, Lu
$4-9 \times 10^{-5}$	V, Ag, Cs, Sm, Hf, Ir, Au
$1-3 \times 10^{-4}$	Sc, Br, Y, Ba, W, Re, Os, U
$4-9 \times 10^{-4}$	Na, Al, Cu, Ga, As, Sr, Pd, I, La, Er
$1-3 \times 10^{-3}$	Co, Ge, Nb, Ru, Cd, Sb, Te, Xe, Nd, Yb, Pt, Hg
$4-9 \times 10^{-3}$	Ar, Mo, Pr, Gd
$1-3 \times 10^{-2}$	Mg, Cl, Ti, Zn, Se, Sn, Ce, Tm, Ta, Th
$4-9 \times 10^{-2}$	K, Ni, Rb
$1-3 \times 10^{-1}$	F, Ne, Ca, Cr, Zr, Tb
10-30	Si, S, Fe

جدول 1-7 : حدود الكشف لواحد وسبعين عنصراً (فيض النيوترونات  $10^{13}$  نيوترون/سم<sup>2</sup> ثانية ولمدة 1 ساعة) .



وإذا تم تشيع مخاليط معقدة مثل العينات الجيولوجية والبيولوجية ظهرت صعوبات عدة في تحديد القمم والتعرف عليها . ولهذا تتم عملية مسح لطيف الطاقة على فترات زمنية لتحديد نصف العمر للقمم من خلال النقص في مساحة القمة مع الزمن . ومن التطبيقات المهمة لـ NAA تحليل المكونات الشحيحة التركيز لكل من الهواء والماء والزربة والعينات الجيولوجية والأنظمة البحرية والبيولوجية . كما يستخدم NAA في العلم الجانبي لقياس مكونات المواد التي تلتصق باليد التي تطلق النار وفي تحديد نوع الطلقات وعددها . وإذا تم تحليل المعادن الشحيحة في النباتات

كان بالإمكان تحديد الأماكن التي زرعت فيها كالمخدرات على ميل المثال . كما تلعب المكونات الشحيحة للقطع الأثرية والفنية في تحديد مكانها الأصلي وإطلاقها. فعلى ميل المثال استطاع العلماء من خلال NAA لكونات الدهان المعدنية في اللوحة الهولندية المسماة بـ كرمست وماجلدين "Christ and Magdalen" أن يثبتوا أنها قد رسمت في القرن العشرين وليس في القرن السادس عشر أو السابع عشر . وذلك لأن تركيز Ag أقل من 7 ppm و Sb أقل من 1.33 ppm في الدهان الأبيض الرصاصي بينما كان تركيز Ag من 10-1000 ppm و Sb من 50-230 في الدهان الأبيض الرصاصي المأخوذ من اللوحات الهولندية المرسومة في القرن السادس عشر أو السابع عشر .

يحتوي شعر الإنسان على كميات شحيحة من العناصر مثل Au , Ce , Na و Cu بنسب متفاوتة من شخص إلى آخر . ويمكن استخدام هذه الظاهرة في التعرف على الأشخاص . ومن التطبيقات على هذا وجود كمية كبيرة نسبياً من الزرنيخ في شعر نابليون بونابرت مما يعني حصوله على جرعات كبيرة من الزرنيخ قبل وفاته وأنه كان هناك محاولة لقتله من قبل طبائحه العميل للمملكة المتحدة (بريطانيا العظمى) . ونظراً لحساسية التحليل بالتنشيط العالية فلقد استخدم في دراسة التلوث البيئي .

#### 4-3-7 التصوير الإشعاعي الآلي Autoradiography

تظهر هذه الطريقة توزيع عنصر أو مركب مشع في عينة ما للعين المجردة أو باستخدام الميكروسكوب وذلك من خلال تسويد أفلام التصوير نتيجة تعرضها للإشعاعات النووية . وهناك عدة أمثلة تبين أهمية هذه الطريقة منها .

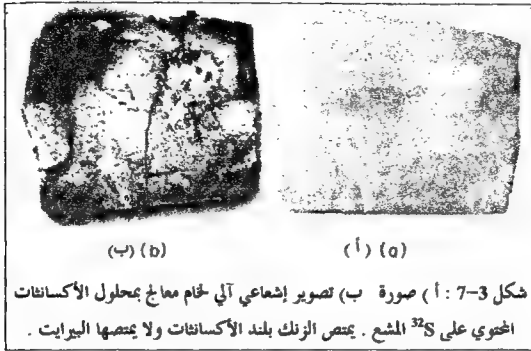
يعتبر الرصاص من الشوائب غير المرغوب فيها في الفولاذ حتى لو كان

بكميات قليلة جداً . ومن أجل معرفة تأثير الرصاص على الفولاذ أضيفت كمية من  $^{212}\text{Pb}$  إلى مصهور الفولاذ ، وبعد تبريده يتم قطع سبيكة الفولاذ بالنشار ومن ثم صقل سطحها المنبسط آلياً وخلشه في حوض التحليل الكهربائي ليعطي سطح منبسط جداً وبكر . بعد ذلك يضغط فلم التصوير بقوة على سطح المعدن فيعرض للإشعاعات من  $^{212}\text{Pb}$  في مكان مظلم ولمدة أسبوع . وبعد تلميع القلم تظهر المناطق الممتعة الأماكن التي يتواجد فيها الرصاص في سطح المعدن ، ووجد أن هناك توزيع منتظم في الفولاذ الصلب وعلى هذا يجب التأكد من خلو المواد الخام من الرصاص في عملية إنتاج الفولاذ .

وإذا كان من الصعب إدخال عنصر مشع بتركيز شحيح إلى داخل المادة شعنا سطح المادة النقي بالنيوترونات أو بالدقائق المشحونة . وهذا سيفيد في تحديد التوزيع لعنصر ما في المادة وفي تحديد مكونات المادة باستخدام التصوير الإشعاعي الآلي وقياس طيف أشعة جاما . وهذه الطريقة مفيدة فقط في تحديد التراكيز الشحيحة في مخلوط بسيط .

ومن الطرق الحديثة المستخدمة لنفس الغرض الميكروسكوب الماسح الإلكتروني والذي يستخدم فلورمنس أشعة إكس الناتجة في التعرف على العناصر . ومن الطرق الأخرى المستخدمة طريقة غمس سطح العينة (معدن أو خامات) المصقول في محلول يحتوي مادة مشعة ، والتي ستفاعل بطريقة انتقائية مع أحد مكونات السطح . ويبين الشكل (3-7) التصوير الإشعاعي الآلي الناتج عن غمس خام ما في محلول إثيل أكسانثات البوتاسيوم الموسوم بالكبريت - 35 ( $^{35}\text{S}$ ) وتفاعل الأكسانثات انتقائياً مع بلند الزنك  $\text{ZnS}$  في العينة . ونظراً لقلّة طاقة بيتا  $E_{\text{max}} = 0.2 \text{ MeV}$  (B) فإن استبانة الصورة الإشعاعية الآلية أفضل . وهذا يشبه

عملية صبغ عينة ميكروسكوب لإظهار جزء معين بوضوح .



شكل 3-7 : ( أ ) صورة ( ب ) تصوير إشعاعي آلي لحام معالج بمحلول الأكسانثات المحتوي على  $^{32}\text{S}$  المشع . يمتص الزنك بلند الأكسانثات ولا يمتصها البرات .

وازدادت أهمية التصوير الإشعاعي الآلي في البيولوجي وخاصة في دراسة انتشار وأيض المركبات المعطاة للنبات أو للحيوان .

#### 7-4 الكيمياء غير العضوية والعضوية والحيوية

##### Inorganic , Organic , and Biochemistry

تلعب العناصر المشعة دوراً مميزاً في دراسة التفاعلات الكيميائية والبيولوجية. وذلك لسهولة التعرف على مكان كل ذرة من خلال تحليلها الإشعاعي وتوفر حساسية كشف كافية . ومن النظائر المشعة التي يمكن تتبعها وعدم فقدانها في خطوات التفاعل الكيميائي  $^{14}\text{C}$  و  $^{32}\text{P}$  و  $^{198}\text{Au}$  والتي قد تكشف تفاصيل تفاعلات الأيض والعمليات الحيوية والتي لا يمكن الكشف عنها بالطرق الأخرى ، وسوف نتطرق إلى بعض النواحي التطبيقية والدراسات المبدئية .



## 1-4-7 تحديد مسارات التفاعل الكيميائي

### Determination of Chemical Reaction Paths

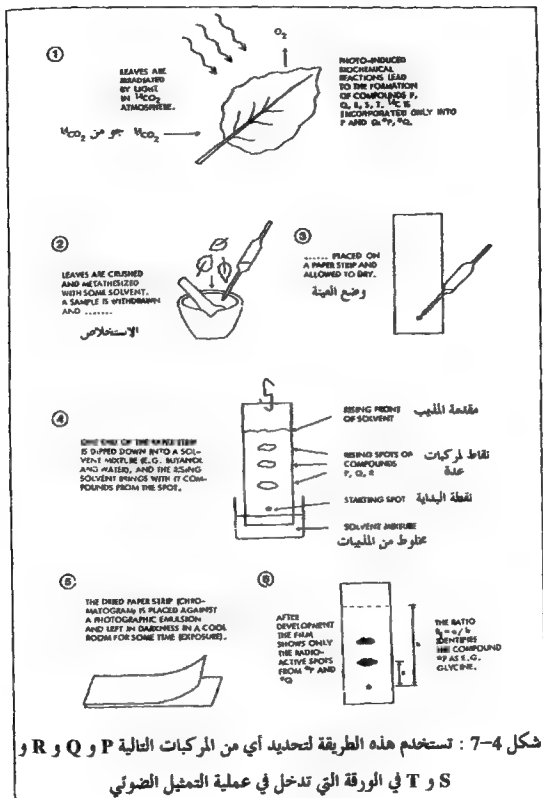
أصبح استخدام النظائر المشعة في دراسة خطوات التفاعل الكيميائي معروفاً ومشهوراً إلى حد كبير . وسوف ندرس بعض الأمثلة على هذا .

إذا تم رسم القبول بالنيوتريوم أو الترييوم (T) في مجموعة الهيدروكسيل ومن ثم تم تسخينه إلى درجة حرارة أقل من درجة التفكك لوحظ أن الهيدروجين الموسوم بهاجر من مجموعة الهيدروكسيل إلى أماكن الهيدروجين الأخرى على حلقة البنزين إما بواسطة إعادة الترتيب الجزيئي الداخلي أو من خلال التفاعلات بين الجزيئات . فإذا استخدمنا  $C_6H_5OT$  و  $C_6H_4TOH$  حصلنا على  $C_6H_4TOT$  ، ولا يمكن له أن يكون إلا من خلال الاصطدامات بين الجزيئات ، مما يعني استبعاد إعادة الترتيب الجزيئي الداخلي كآلية لحلول التفاعل .

ومن الأمثلة الرائعة على استخدام النظائر المشعة ، دراسة خطوات التفاعل في عملية التمثيل الضوئي للكربوهيدرات من غاز  $CO_2$  في الجو . وتتل المعادلة التالية التفاعل الكلي :



ولقد تمكن العالم م. كالفن وزملائه في التعرف على الخطوات الواقعة في الوسط باستخدام  $^{14}C$  و  $^{32}P$  و T (الشكل 7-4) . ويتم وضع النباتات في جو يحتوي على  $CO_2$  الموسوم بالكربون  $^{14}C$  14 وتسلط الضوء عليه ، بعد ذلك تزال النباتات التي تعرضت للضوء لفترات زمنية مختلفة ثم تفصل المكونات الجزيئية باستخدام أنواع الكروماتوغرافيا المختلفة . إن وجود الكربون المشع في مركب ما دليل على وجوده في عملية التمثيل الضوئي (الشكل 7-4) . وأما الفسفور والهيدروجين فيستدل على وجودهم من خلال الكشف عن النشاط الإشعاعي للفسفور والترييوم في المركبات .



## 7-4-2 تحديد سرعة التبادل الكيميائي

### Determination of Chemical Exchange Rate

إذا خلطنا مادتين كيميائيتين مختلفتين ومشتريتين في عنصر ما في المحلول ، فقد يحصل تبادل للمكون المشترك بينهما . ويمكن تمثيل ذلك بالمعادلة الكيميائية (7-4) .



ويبقى تركيز ونوع المواد الكيميائية كما هو دون أي تغيير ، ولا يمكن ملاحظة التبادل إلا إذا وسما الذرات في إحدى المفاعلات . فيمكن تتبع التفاعل إذا استخدمنا  $X^*$  كنظير مشع لـ  $X$  . وفي حالة الاتزان يتوزع النشاط الإشعاعي بالتساوي بين المادتين الكيميائيتين ، أي أن النشاط النوعي لـ  $X^*$  في  $AX$  و  $BX$  متساوي . وفي حال كانت  $AX$  و  $BX$  إلكترونات قوية حدث التوزيع المتساوي فور خلطهم . وإذا كانت إحدى المواد المتفاعلة معقد غير عضوي أو جزيء عضوي كان التبادل بطيء في حال حدوثه .

وبما أن الصيغ الكيميائية لم تتغير من خلال التبادل النظيري فإنه لن يكون هناك أي تغيير في المحتوى الحراري ، وسيكون هناك زيادة في الفوضى الكلية للنظام (الأنثروبي الكلية للنظام) نتيجة للانتشار المنتظم لنظير  $X$  في جميع أنحاء النظام . وتؤدي هذه الزيادة في الأنثروبي إلى زيادة في الطاقة الحرة ، مما يجعل التبادل النظيري تفاعلاً تلقائياً . وعلى الرغم من هذه التلقائية ، فإن التبادل النظيري قد لا يحدث أو يكون بطيئاً جداً نتيجة لوجود طاقة تنشيط كبيرة وضرورية للوصول إلى الحالة الانتقالية .

وبالرجوع إلى المعادلة (7-4) فإن سرعة زيادة  $AX^*$  تساوي سرعة تكونه ناقص سرعة هدمه (تحلله) . وتساوي سرعة تكون الناتج حاصل ضرب سرعة التفاعل  $K_p$  في كسر التفاعلات التي تحدث مع  $BX^*$  النشاط في كسر التفاعلات

التي تحدث مع AX غير النشط . ومن خلال استخدامنا للرموز التالية :

$$a = [AX] + [AX^*] \quad (أ 7-5)$$

$$b = [BX] + [BX^*] \quad (ب 7-5)$$

$$x = [AX^*] \quad (أ 7-6)$$

$$y = [BX^*] \quad (ب 7-6)$$

فإن سرعة التكون  $K_f$  تساوي :

$$K_f \frac{y(a-x)}{b} \quad (7-7)$$

وسرعة الهدم  $K_d$  تساوي :

$$K_d \frac{x(b-y)}{a} \quad (7-8)$$

وإن  $\frac{dx}{dt} = \frac{d[AX^*]}{dt}$  وتساوي :

$$\frac{dx}{dt} = K_f - K_d = \frac{K_f}{ab}(ay - bx) \quad (7-9)$$

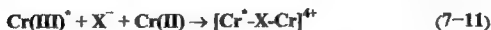
وحل هذه المعادلة (7-9) يساوي :

$$\ln(1-F) = -\frac{(a+b)}{ab} K_f t \quad (7-10)$$

وأما  $\frac{x_1}{x_\infty} = F$  تساوي قيمة  $X_e$  عندما  $t = \infty$  أي عند الاتزان .

وإذا رسمنا  $\log(1-F)$  ضد  $t$  حصلنا على خط مستقيم ميله يساوي سرعة التبادل  $K_f$  . ويستخدم التبادل النظري بشكل رئيسي في دراسة حركات التفاعلات الكيميائية ذات أنصاف الأعمار التي تزيد عن دقيقة . ومن الأمثلة على ذلك التبادل بين الكروميوم الثنائي والثلاثي في محاليل  $HClO_4$  . فبالا كان تركيز أيون الكروميوم الكلي 0.1 ج (M) احتاج 14 يوماً ليصل التبادل إلى ما نسبته 50٪ عند درجة حرارة

الفرقة . وبما أن شحنة الكروميوم (II) والكروميوم (III) موجبة فإنه من غير المعقول أن يقرّبوا من بعضهما البعض ليتبادلوا الإلكترون والميكانيكية المقترحة أو المتوقعة مبنية على وجود أيون سالب كجسر بين الأيونين الموجبين فيقلل من قوة التافر بينهما .  
وإذا استخدمنا  $Cr(III)^*$  النشاط حصلنا على الميكانيكية التالية لتفاعل الاستبدال النظري :



وتدعم هذه الميكانيكية بوجود أيونات سالبة لديها القدرة على تكوين معقدات بسهولة أكثر من أيون البيركلورات . فإذا استخدمنا محلول HCl بدل  $HClO_4$  ازدادت سرعة التبادل فوصل نصف زمن التبادل إلى دقيقتين ، وهذا يؤيد الميكانيكية المقترحة لأن لأيونات الكلوريد قدرة أعلى على تكوين المعقدات من أيونات البيركلورات . ويستفاد من الكروميوم المشع في الدلالة على التبادل .

### 3-4-7 تحديد ثوابت الاتزان

#### Determination of Equilibrium Constants

ونظراً لحساسية الكشف عن النظائر المشعة ، فلقد استخدمها العلماء في قياس الذائبية للمواد القليلة الذوبان . ولقد أجرى العالمان دي . هافزي وبانيت (عام 1913) أول هذه التجارب لدراسة ذائبية كرومات الرصاص . فأضيفت أيونات الكرومات إلى محلول  $PbCl_2$  يحتوي على كمية معروفة من  $^{210}Pb$  فرسب كل الرصاص على هيئة  $PbCrO_4$  . احتوى الراسب على 2030 وحدة نشاط إشعاعي وكانت كتلته 11.35 ملغم . أي أن النشاط النوعي للراسب  $= \frac{2030}{11.35}$

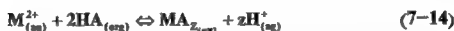
179 وحدة نشاط/ملغم . بعد ذلك أخذ الراسب ووضع في الماء ورج ، فذاب جزء من الراسب فاحتوى اللر من اغلول على 2.14 وحدة إشعاع . أي أن الذائية لكرومات الرصاص تساوي  $\frac{2.14}{179} = 0.012$  ملغم/لر أو  $3.7 \times 10^{-8}$  جر  $Pb^{2+}$  ، وإذا كان تركيز  $[Pb^{2+}] = [CrO_4^{2-}]$  ، فإن حاصل الذائية  $K_{sp} = (3.7 \times 10^{-8})^2 \approx 1 \times 10^{-15}$  والقيمة المقاسة حديثاً بدقة أكثر  $2 \times 10^{-14}$  .

بعد ذلك ازداد استخدام النظائر المشعة ، فاستخدمت في قياس ثوابت الاستقرار للمعادن  $\beta_n$  والتي تُعرف كالآتي :

$$\beta_n = \frac{[ML_n]}{[M][L]^n} \quad (7-13)$$

حيث حذفت الشحنات للتسهيل (فعلى سبيل المثال  $M = Pu^{4+}$  و  $L = Cl^-$  ) وم الطرق المستخدمة في قياس  $\beta_n$  : النظائر المشعة بتركيز شحيح مع الاستخلاص بالمذيب والتبادل الأيوني . وسوف ندرس أولاً الاستخلاص بالمذيب .

إذا كونت المعادن معقدات متعادلة مع المتصلات العضوية فإن هذه المعقدات تذوب في المذيبات العضوية (كالكرومين والبنزين والتولين والكلوروفورم ورابع كلوريد الكربون) حسب المعادلة التالية :



حيث أن HA حامض عضوي ضعيف مثل أسيتيل أسيتون وأوكسين ودايبازون وحامض داي إيثيل هكسيل الفوسفوريك وغيرها . ويتم التحكم بعوزيع المعدن D بين المذيب العضوي والماء من خلال العلاقة التالية :

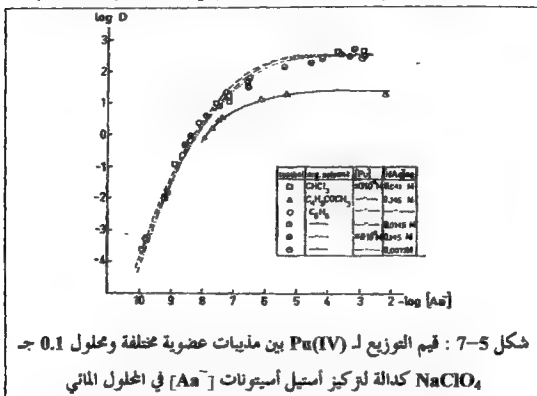
$$\frac{1}{D} = \frac{[\text{المعدن}]_{aq}}{[\text{المعدن}]_{org}} = (\lambda_z \beta_z [A]^z)^{-1} \sum_{n=0}^N \beta_n [A]^n \quad (7-15)$$

وتقاس قيمة D بسهولة باستخدام نظائر المعادن بتركيز شحيح ، و Z الشحنة

(وتساوي 2 لـ  $Sr^{2+}$  و 3 لـ  $La^{3+}$  و 2 لـ  $UO_2^{2+}$  و 4 لـ  $Th^{4+}$  وهكذا) ، و  $\beta_n$  ثابت الاستقرار للمعدن وتعرف  $\lambda_Z$  في حال  $n=Z$  كالآتي :

$$\lambda_n = [MA_n^{z-n}]_{org} / [MA_n^{z-n}]_{(aq)} \quad (7-16)$$

وتحدد D فقط على [A] وهو تركيز المتصلة الحرة في الطبقة المائية (معادلة 7-15) .



شكل 5-7 : قيم التوزيع لـ Pu(IV) بين مذيبات عضوية مختلفة ومحلل 0.1 جـ  $NaClO_4$  كدالة لتركيز أستيل أسيتونات  $[Aa^-]$  في المحلول المائي

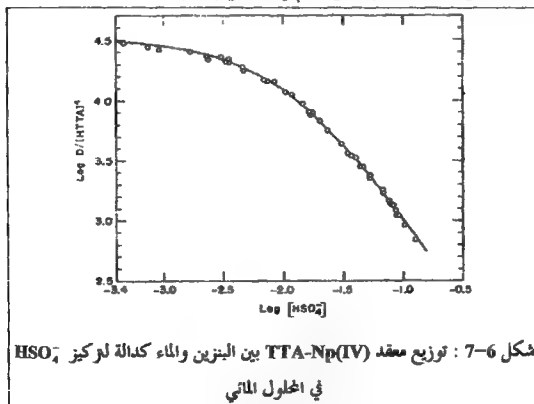
ويبين الشكل (5-7) قيم التوزيع المقاسة لـ Pu(IV) بين الماء وثلاث مذيبات عضوية مختلفة كدالة لتركيز أيون أستيل أسيتونات  $[Aa^-]$  في الوسط المائي. وتحسب قيم ثوابت التكوين لـ  $PuAa^{3+}$  و  $PuAa_2^{2+}$  و  $PuAa_3^{+}$  و  $PuAa_4$  وقيم  $\lambda_Z$  (مثل ثابت التوزيع لـ  $PuAa_4$ ) من المنحنيات الموضحة في الشكل (5-7) .

وإذا احتوى النظام على معقدات  $MB_r$  والتي لا تذوب في المذيب العضوي

فإنه بالإمكان استخدام النظام السابق ( $MA_n$ ) مع المتصلة  $B^-$  . فعلى سبيل المثال تم دراسة ارتباط  $Np^{4+}$  مع  $HSO_4^-$  في نظام المذيبين (الوسطين) ، محلول 0.1 جـ  $NaClO_4$  في الماء ومحلول المادة العضوية ثينول ثلاثي فلورو الأسيتون (HTTA) "مادة الاستخلاص" في  $CHCl_3$  الكلوروفورم . وفي هذه الدراسة تستخدم العلاقة التالية :

$$\frac{1}{D} = a + b \sum_{p=0}^N \beta_p [B]^p \quad (7-17)$$

حيث أن  $a$  و  $b$  ثابتين للنظام  $Np$ -HTTA (يجب أن لا يتغير تركيز HTTA ولا درجة الحموضة pH) . وتم حساب قيم ثوابت التكوين لـ  $Np(SO_4)_2$  و  $Np(SO_4)^{2+}$  من القيم في الشكل (7-6) .



وتستخدم هذه العلاقات في الحالات التي قد يصل فيها تركيز المعدن إلى أقل



من  $10^{-12}$  ج . بعد ذلك استعملت هذه الطريقة في دراسة معقدات العناصر التي تأتي بعد اليورانيوم ، وذلك لعدم الرغبة (تجنباً للإشعاعات) واستحالة استخدام كميات كبيرة من هذه العناصر .

يعتمد التبادل الأيوني على توزيع أيونات المعادن الموجبة بين الماء وراتنج عضوي ذو خاصية تبادل أيوني موجب حسب العلاقة التالية :

$$\lambda_p = \left[ \frac{MB_p^{Z-P}}{MB_p^{Z-P}} \right]_{\text{مع}} / \left[ \frac{MB_p^{Z-P}}{MB_p^{Z-P}} \right]_{\text{هـ}} \quad (7-18)$$

حيث أن  $P < Z$  وتقاس  $\lambda$  بدلالة كمية المعدن لكل غرام راتنج جاف مقسومة على كمية نفس المعدن لكل مليلتر محلول . وفي حال تكون عدة معقدات ( $MB_2^{Z-2}, MB^{Z-1}$  ... إلخ) فإن التوزيع  $Q$  للمعدن المشع بين الراتنج والوسط المائي يتبع العلاقة التالية :

$$O = \sum_p^N (Q - \lambda_p) \beta_p [B]^p \quad (7-19)$$

وإذا تم قياس  $Q$  كدالة لتركيز  $[B]$  ، استطعنا حساب  $\lambda$  و  $\beta$  . وفي حال كانت  $P < 2$  أصبحت هذه الطريقة أكثر تعقيداً من الاستخلاص بالمذيب .

#### 7-4-4 دراسة السطوح والتفاعلات في المواد الصلبة

##### Studies of Surfaces and Reactions in Solids

أثبتت الدراسات باستخدام النظائر المشعة بتركيز شحيح وجود تبادل سريع جداً بين ذرات المعدن الموجودة على سطحه وأيونات ذلك المعدن في المحلول . وعلى الرغم من ارتباط التبادل مع سطح المادة الصلبة ، فلقد حدث في خلال دقائق تبادل مع ذرات عمقها مئات الطبقات في سطح المعدن ، ونحصل على عمق اختراق (توغل) النظائر المشعة الممتازة من المحلول من قياس الامتصاص

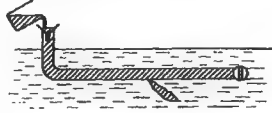
للإشعاع . وبنفس الطريقة يدرس انتشار ذرات ما في القطع الصلبة المكونة من تلك الذرات . فإذا استخدمت بلورات وحيدة من الفضة وعلقت في محلول من . ذرات الفضة الموسومة بـ  $^{110m}\text{Ag}$  ظهرت بوضوح سرعات الانتشار المختلفة في وجوه البلورة المختلفة . وتقاس مساحة سطح المواد الصلبة من خلال امتصاص (امتزاز) النظائر الشحيحة التركيز على السطح .

ولدراسة الامتصاص والانتشار درو مهم في فهم آلية حدوثهما وفي فهم آلية تبلور أو تكون المواد الصلبة الجديدة . وتظهر أهمية ذلك في صناعة الإسمت والزجاج وفي إنتاج شبه الموصلات وفي صناعة الدهان . ودراسة التفاعلات التي تجري على السطح أهمية عملية في التآكل كالصدأ وفي طلي المعادن وتلميعها وفي كيفية عمل المنظفات .

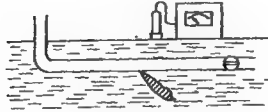
## 7-5 جريان السوائل Flow of Liquids

تلعب النظائر الشحيحة التركيز دور مهم في علم المياه Hydrology . وباستخدام المواد والنظائر المشعة التالية  $\text{T}_2\text{O}$  و  $^{24}\text{Na}^+$  و  $^{82}\text{Br}^-$  و  $^{51}\text{Cr-EDTA}$  وغير ذلك من العناصر والمركبات المشعة يمكن قياس حجم المخزون الاحتياطي للمياه الجوفية وحركة المياه السطحية والجوفية . كما تستخدم النظائر المشعة في تحديد استهلاك المياه وجريانها في الصناعات وفي فحص تسرب المياه من السدود والأنابيب .

يبين الشكل (7-7) الطريقة المتبعة في التعرف على أماكن التسرب في الأنابيب وفي دراسة توصيلات الكوابل الكهربائية تحت الأرض باستخدام الغازات المشعة مثل  $^{133}\text{Xe}$  ,  $^{85}\text{Kr}$  .



(a)



(b)

شكل 7-7 : الطريقة المتبعة في التعرف على أماكن التسرب في الأنابيب  
 أ) يضاف النظير المشع إلى السائل في الأنبوب .  
 ب) يتم التعرف على النشاط الإشعاعي من التسرب بعد إزالة الغلظل المشع من داخل الأنبوب .

إنه لمن الصعب قياس حجم السائل في الأنظمة المغلقة من خلال معرفة أبعاد الخزان الخارجية وخاصة إذا كان هناك عملية خلط تجري بطريقة الدوران الخارجي أو التحريك الداخلي ، ومن الأمثلة على ذلك قياس حجم حامض الكبريتيك في مصنع التقعد حيث يكون هناك عملية خلط داخلية كبيرة بين الحامض والهيدروكربون تمنع تحديد المستوى بسهولة ، ولهذا يضاف  $^{134}\text{Cs}$  معروف الكمية إلى  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ، ومن خلال التخفيف للنظير المشع نحسب حجم  $\text{H}_2\text{SO}_4$  الكلي .  
 وفي حال كان هناك جريان مستمر من وإلى الخزانات ولكمية ثابتة ، استخدمت الطريقة التالية : تضاف كمية معروفة من النظير المشع إلى الخط القادم إلى الخزان ونفترض رياضياً أن هناك عملية خلط كاملة وفي الحال بين الجرى القادم

ومحتويات الخزان ، أي أن هناك نقصان أسي لتركيز النظير المشع ، وتحدد سرعته من الكمية المضافة والحجم حسب المعادلة التالية :

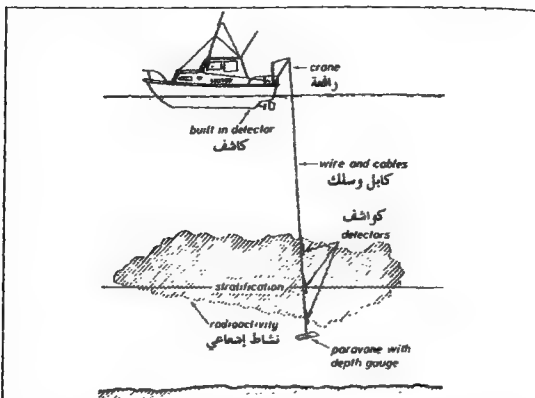
$$R = R_0 e^{-Ft/V} \quad (7-20)$$

حيث أن  $R_0$  سرعة العد عند الزمن صفر و  $t$  زمن قياس  $R$  سرعة العد عند نفس النقطة .

وتقاس سرعة جريان  $F$  الأنهار والجداول بواسطة إضافة أو حقن مادة مشعة إلى المياه الجارية ومن ثم يقاس الزمن الذي تحتاجه للوصول إلى كاشف موضوع في أسفل الجرى . فإذا أضيفت الكمية المعروفة ( $A_0$ ) من المادة المشعة إلى النهر ومن ثم سجل العد الكلي ( $R_{\text{كلّي}}$ ) في أسفل الجرى ، فإن سرعة الجريان ( $F$ ) تساوي :

$$F = \psi \frac{A_0}{R_{\text{كلّي}}} \quad (7-21)$$

حيث أن  $\psi$  معامل المعايرة والذي يحدد تحت ظروف معروفة ، وتأخذ هذه الطريقة بالحساب عمليات الخلط الطولية والعرضية . ولتجنب عمليات التلوث الخطرة يجب علينا التأكد من أن الفضلات المنزلية والصناعية (غازات وموائع ومواد صلبة) موزعة توزيعاً منتظماً ، ولمعرفة مواقع التوزيع المختلفة تضاف كمية من نظير مشع إلى موقع الفحص ، ومن ثم تتم عملية التتبع على أعماق وارتفاعات واتجاهات مختلفة (الشكل 7-8) . وقد بينت إحدى الدراسات على المخلفات الصلبة المفرغة في نهر التايغز عند نقطة معينة تحرك هذه المخلفات إلى أعلى الجرى وقد أدى ذلك إلى تغير في موقع أنبوب التفريغ .



شكل 7-8 : الطريقة المستخدمة في قياس خطوط التيار في مضيق أوسوند في أوروبا

أطلقت تجارب القنابل النووية كميات كبيرة من النظائر المشعة إلى الجو ، وقد نزلت هذه النظائر إلى سطح الأرض بفعل ثقلها أو بفعل الأمطار. واستفاد علماء الجيوفيزياء من هذا التساقط فقاموا بقياس  $T$  (HTO ماء) و  $^{90}\text{Sr}$  و  $^{137}\text{Cs}$  وبعض نواتج الانشطار الأخرى في المياه لمعرفة مسارها وحركتها من اليابسة عبر البحيرات والأنهار إلى البحار وفي دراسة التيارات المائية في المحيطات وعملية التبادل بين المياه السطحية والجوفية . ونتيجة هذه الدراسات تم رسم خارطة دوران المياه في الكرة الأرضية وبالتفصيل . كما تمت دراسة الأعاصير الموسمية وتكونها من خلال قياس كمية الماء الموجودة في عين الإعصار والمأخوذة من المحيط وذلك لأن تركيز HTO في الجو العادي يختلف عن ذلك في مياه المحيط السطحية.

## 6-7 بعض استخدامات النظائر المشعة في الصناعة

### Some Industrial Uses of Radiotracers

استخدمت الصناعة النظائر المشعة في مجالات متعددة وكثيرة ، ويقدر عدد المصانع المستخدمة بأكثر من 250 مصنعاً في الولايات المتحدة ، منها إنتاج المعادن والكيمائيات والبلاستيك والأدوية والورق والمطاط والفخار والأدوات الزجاجية والطعام والتبغ وغيرها .

كما استخدمت النظائر المشعة في دراسة فعالية الخلط وتأثير الشكل الهندسي للمفاعلات وزمن الإقامة في المفاعلات ومسرعة الجريان ونوعية أعمدة وأبراج التقطير والامتصاص وغيرها .

يعتبر الخلط من العمليات الميكانيكية المهمة في الصناعات ، فالخلط الرديء يؤدي إلى منتجات غير مرضي عنها وإلى مردود قليل ، أما الخلط الزائد عن الحاجة فيؤدي إلى ضياع الوقت والطاقة . ويمكن أن تتابع الاقتراب من الاتزان الخلطي بإضافة نواة مشعة إلى وعاء الخلط أو رسم إحدى المكونات ، وتتم المتابعة من خلال القياسات الخارجية أو من خلال أخذ عينات على فترات زمنية مختلفة . ومن الأمثلة على ذلك عملية خلط الإسمنت مع الرمل والحصى والماء لتعطي الخرسانة والتي تمت من خلال استخدام الحصى المشعة ، وإذا أضيف  $^{24}\text{NaHCO}_3$  إلى مصهور الزجاج تبين للدارس مقدار التجانس في المصهور ، واستخدمت مركبات  $^{95}\text{Zr}$  العضوية في متابعة التجانس في المنتجات البوليمرية ، ومن الاستخدامات الأخرى إضافة الفيتامينات إلى الطحين ومسحوق الفحم إلى المطاط . ويقاس نفاذ وانتقال المواد من خلال جعل المادة التي تنفذ مشعة ، ولقد استخدمت هذه الطريقة في تتبع نفاذ واستهلاك القطع الموجودة في محركات السيارات وفي أدوات القطع

وفي مُخَمِّل الكُرَيَات وفي بطانة الأفران وفي كَشَط الدهان وغيرها ، على أن يكون للسطح الذي ينفذ نشاط نوعي عالٍ . وإذا كان من الصعب تعليم المادة بإضافة ذرات مشعة لها (كالتلي عليها) ، فإنه لا بُد من تشيعها بواسطة مسارات الدقائق أو المفاعلات .

## 7-8 تصرف النظائر شحيحة التركيز

### Behavior of Trace Concentrations

تشترك ذرات النظير المشع شحيح التركيز في الكثير من التطبيقات مع كمية كبيرة من ذرات نظير غير مشع لنفس العنصر . ويسمى الشريك المستقر بالحامل "Carrier" وذلك لأنه يحمل النشاط الإشعاعي ويؤكد التصرف الكيميائي العادي. فإذا أخذت عينة تتحلل  $10^7$  تحلل/الدقيقة ونصف عمرها ساعة واحدة فإن عدد ذراتها  $1.7 \times 10^9$  ذرة ، وإذا كان نصف عمرها سنة واحدة فإن عدد ذراتها  $1.5 \times 10^{13}$  ذرة . فإذا أذيت هذه العينة في لتر من المحلول أعطت التركيزين التاليين  $2.8 \times 10^{-15}$  جـ و  $2.5 \times 10^{-11}$  جـ على التوالي . وقد يختلف التصرف الكيميائي اختلافاً تاماً عند هذين التركيزين بالمقارنة مع التراكيز العالية ، فإذا أضيفت بضع غرامات من نظير غير مشع لنفس العنصر كحامل ارتفعت التراكيز إلى  $10^{-3}$  جـ و  $10^{-1}$  جـ وأصبح التصرف عادي .

وإذا كان لا بُد من أن يتبع النظير المشع الخواص الكيميائية للنظير الحامل فإنه من الضروري أن يحدث تبادل نظيري بينهما ، وإذا كان التبادل النظيري غير معروف من قبل فلا بد من إثباته بالتجربة قبل أن نفرض تصرفهما الكيميائي المشابه ، وخاصة إذا كان للنظير المشع رقم تأكسد يختلف عن الحامل عند

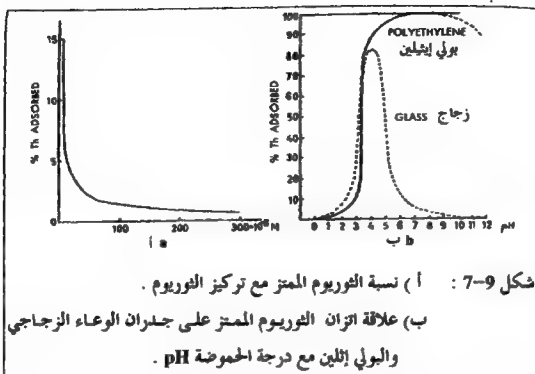
خلطهما. وسوف ندرس التصرف الكيميائي للنظير المشع شحيح التركيز وذلك لوجود بعض التطبيقات التي يستخدم فيها النظير المشع شحيح التركيز فقط .

### 1-7-8 الامتزاز Adsorption

للمواد المذابة خاصية الامتزاز على السطح ، فإذا أردنا تغطية السطح الزجاجي الداخلي لوعاء حجمه واحد لير بطبقة سمكها جزئي واحد من أيون موجب ميه احتجنا إلى  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  مول منه . وبما أن تركيز النظير المشع الشحيح أقل من ذلك فإن جميع النرات المشعة سوف تمتاز على جدران الوعاء وتحتد كمية النظير المشع الممتز على جدران الوعاء على تركيزه وصيغته الكيميائية وعلى طبيعة المادة المكونة للوعاء . وبين الشكل (9-7) اختلاف امتزاز الثوريوم على جدران من زجاج ومن بولي إيثيلين مع التركيز ودرجة الحموضة .

ويعكس التغير في الامتزاز مع درجة الحموضة امتزاز الأنواع الميهة المختلفة التي كونها الثوريوم كلما ازدادت درجة الحموضة . ويزداد الامتزاز بوجه عام مع شحنة الأيون حسب الترتيب التالي  $M^{4+} < M^{3+} < M^{2+} < M^{1+}$  . وبين الشكل (9-7 b) أهمية طبيعة السطح بين البولي إيثيلين والزجاج . وفي حالة Pm(III) فإن ترتيب الامتزاز كالآتي : بولي فينيل الكلوريد < الفولاذ < الفضة < البلاين . ويؤدي إضافة النظير الحامل إلى تخفيف النظير الشحيح ، أي أن جزء قليل منه سوف يمتز (الشكل 9-7) ، ويؤدي التخفيف إلى انخفاض في النشاط النوعي للعنصر المشع وإلى تأثير سلبي في بعض الأنواع من التجارب . ولتجنب النقص في النشاط النوعي تضاف كميات كبيرة من نظير لعنصر آخر يمتاز بسهولة وقد يسد السطوح المتوفرة لامتزاز النظير الشحيح .





شكل 7-9 : ( أ ) نسبة الثوريوم الممتز مع تركيز الثوريوم .  
 ( ب ) علاقة ائزان الثوريوم الممتز على جدران الوعاء الزجاجي  
 والبولي إيثيلين مع درجة الحموضة pH .

وكما تمتز النظائر المشعة على جدران الأوعية فإنها تمتز على الرواسب الموجودة في النظام . وتعتمد الكمية الممتزة على طبيعة الراسب وصيغته وشكله وطريقة ترسيبه . فإذا تم ترسيب يوديد الفضة من محلول فيه زيادة في أيونات الفضة كان للراسب سطح موجب لوجود أيونات فضة زائدة على السطح . ويحدث العكس إذا تم الترسيب من محلول يحتوي على أيونات اليوديد السالبة الزائدة . وعند إضافة تركيز شحيح من الرصاص المشع إلى كل منهما في الماء ، تبين أن الراسب الحامل للشحنة السالبة على سطحه يمتز أكثر من 70% من أيونات الرصاص الشحيحة بالمقارنة مع الراسب الحامل للشحنة الموجبة على سطحه والذي يمتز أقل من 5% . وتزداد كمية الامتزاز مع الشحنة الأيونية للنظير المشع الشحيح، فعلى سبيل المثال يمتز حوالي 7% من  $Ra^{2+}$  و 75% من  $Ac^{3+}$  و 100% من  $Th^{4+}$  على راسب  $Ag_2S$  (كبريتيد الفضة) .

وتنص قاعدة بانيث وفاجان The Paneth and Fajans rule لامتماز النظر شحيحة التركيز على "تمتد المكونات الصغيرة (القليلة) على المكونات الكبيرة (الكثيرة) الصلبة أو تترسب معها إذا كونت مع أحد أيونات المكونات الكبيرة مركب غير ذائب".  
واستخدم العلماء خواص الامتماز للعناصر الشحيحة في عزلها وفي فصلها عن بعضها البعض بناءً على خواص امتزازها .

### 2-8-7 Radiocolloids الغرويات المشعة

بالإضافة لامتماز العناصر المشعة شحيحة التركيز على سطوح الأوعية الصلبة والرواسب فإنها تمتاز على أي نوع من المواد الصلبة المعلقة أو الملامسة للمحلول . ومن الأمثلة على ذلك الغبار وألياف السليولوز وقطع الزجاج والمواد العضوية وغيرها . وإذا احرى المحلول على جزيئات كبيرة مثل نواتج ثمية الفلزات المبلعمة فإنها تستمر العناصر الشحيحة . ويؤدي وجود هذه المواد إلى ظاهرة تكون الغرويات المشعة Radiocolloid formation حيث تتجمع الأتوية المشعة مع بعضها البعض مكونة تجمعات شبه غروية في المحلول . ولقد درست هذه الظاهرة بالتفصيل بطريقة سرعة الانتشار وطريقة التصوير الإشعاعي الآلي . ولتجنب تكون الغرويات المشعة ، تحفظ المحاليل عند درجة حموضة pH منخفضة ونقية من الدقائق الكبيرة الغريبة .

### 3-8-7 Equilibrium Reactions التفاعلات الاتزان

يؤدي التركيز المنخفض للعناصر المشعة الشحيحة إلى تكون كميات مختلفة من المواد المذابة من تلك المعروفة عند اتزان المواد ذات التركيز العالي . فعلى سبيل

المثال تتميه أيونات اليورانييل حسب الاتزان التالي :



فإذا كان تركيز اليورانيوم عالٍ انزاح الاتزان إلى اليمين مكوناً بوليمرات ذات خواص مختلفة عن أيون اليورانييل  $\text{UO}_2^{2+}$  . وعند تركيز اليورانيوم 0.001 جـ و  $\text{pH} = 6$  يتبلر اليورانيوم بنسبة تزيد عن 50٪ ، بينما يتعلم التبلر تقريباً عندما يصل تركيز اليورانيوم إلى أقل من  $10^{-6}$  جـ . ويختلف موضع الاتزان بين الكميات الكبيرة للمواد والكميات الشحيحة للمواد وتستخدم هذه الحقيقة في دراسة خواص أيون معدن ما عند درجات الحموضة العالية وبعيداً عن تفاعلات البلورة .

وقد تظهر تعقيدات إضافية في المحلول نتيجة لتفاعل المواد المشعة شحيحة التركيز ، فعلى سبيل المثال ، عندما درست خواص البروتاكتينيوم الخماسي  $\text{Pa(V)}$  وجد أنه يستخلص إلى الأكسيلين النقي من محلول 1 جـ  $\text{HClO}_4$  وذلك لوجود شوائب عضوية في الأكسيلين وبتراكيز أقل من التي يمكن الكشف عنها . ولإثبات هذا أضيف الثوريوم بتركيز  $10^{-4}$  جـ إلى المحلول لأنه يكون معقدات مع هذه الشوائب وفعلاً لم يستخلص البروتاكتينيوم إلى الأكسيلين .

#### 7-8-4 الترسيب والتبلور

##### Precipitation and Crystallization

نظراً لانخفاض تركيز المواد المشعة شحيحة التركيز في المحلول فإنه من النادر أن نتعدى حاصل الذائبية للمح ما نتيجة لإضافة تراكيز عالية من أيون ما مضاد . فعلى سبيل المثال إذا كان لدينا 5 كوري/ليتر من  $^{212}\text{Pb}$  والذي يساوي  $1.7 \times 10^{-4}$  جـ وأضيف إليه أيون الكبريتات بتركيز 10 جـ فلن يتعدى ذائبية

كبريتات الرصاص . وفي حال تعدى حاصل الذاتية فلن يلاحظ الترسيب ، ومن الأمثلة على ذلك كبريتيد الرصاص PbS والذي له حاصل ذاتية  $K_{sp} = 10^{-28}$  ، فإذا كان تركيز  $[Pb^{2+}] = 1.7 \times 10^{-14}$  ج. وتركيز  $[S^{2-}] = 1$  ج. فمن المتوقع أن يترسب PbS ولكنه لا يلاحظ لوجوده على الشكل الغروي لانخفاض التراكيز وإذا استخدمت طريقة الطرد المركزي فإن كمية الراسب قليلة جداً لا يمكن وزنها بالطرق المعروفة .

ومن الممكن فصل الأيونات الموجودة بتركيز شحيح من المحاليل بالترسيب مستخدمين الامتزاز أو الترسيب المشترك . ويحدث الترسيب المشترك إذا كان المركب الشحيح وأيون الراسب ذو الشحنة المعاكسة تركيب بلوري مشابه للراسب . فقد يدخل الأيون النشط الشبكة البلورية للراسب عند نقطة شبكية ما وخاصة إذا كان حجم الأيون الشحيح قريب جداً من حجم الأيون الذي يحل مكانه . ومع ذلك فلقد وجد في حال كانت التراكيز شحيحة استثناء لمطلب التشابه في الحجم والتركيب البلوري . وإذا كان توزيع الشحيح متجانس في جميع أنحاء الراسب وصف بقانون التوزيع المتجانس التالي :

$$\frac{X}{Y} = D' \left( \frac{a-x}{b-y} \right) \quad (7-23)$$

حيث تمثل X و Y كمية كل من  $A^+$  و  $B^+$  في الراسب وتمثل a و b التركيز الأولي لهذين الأيونين ، وأما  $D'$  فهو معامل التوزيع ، ويساوي ثابت التوزيع الحقيقي  $D = \text{تركيز الشحيح في الصلب} / \text{تركيز الشحيح في المحلول}$  ، ويرتبط مع معامل التوزيع  $D'$  من خلال معامل التحويل C .

$$D' = DC \quad (7-24)$$

ويساوي معامل التحويل = غم مذاب لكل مل من محلول الحامل المشبع

كثافة الصلب

أي أن هناك اتزان بين كل من الراسب والمحلول .

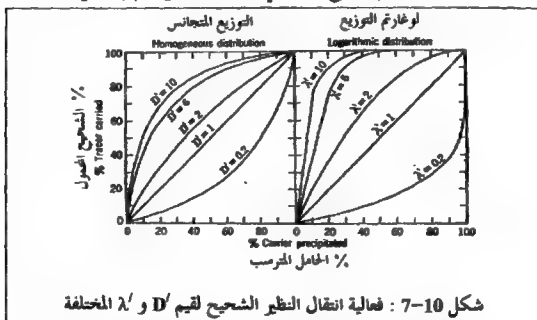
وإذا كان هناك اتزان بين السطح المكون حديثاً للبلورة النامية والمحلول فلن

يلاحظ التوزيع المتجانس . ويوصف النظام في هذه الحالات بقانون التوزيع

اللوغاريتمي التالي :

$$\ln\left(\frac{a}{a-x}\right) = \lambda' \ln\left(\frac{b}{b-y}\right) \quad (7-25)$$

حيث أن  $\lambda'$  معامل التوزيع اللوغاريتمي وقيمته ثابتة لكل نظام (الشكل 7-10) .



شكل 7-10 : فعالية انتقال النظير الشحيح لقيم  $\lambda'$  و  $D'$  المختلفة

وتظهر أهمية التشابه البلوري في الترسيب المشترك (الإسهامي) لأيون  $Ra^{2+}$

الشحيح مع  $Sr^{2+}$  في نترات السرنشيوم عند  $34^\circ\text{C}$  ، وذلك بسبب التشابه البلوري

بين  $Ra(NO_3)_2$  و  $Sr(NO_3)_2$  وفي حال أجريت التجربة عند  $4^\circ\text{C}$  فيترسب

السرنشيوم على هيئة  $Sr(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  المختلف بلورياً عن  $Ra(NO_3)_2$  . مما

يعني عدم حدوث الترسيب المشترك للرايديوم عند  $4^\circ\text{C}$  .

## 7-8-5 الخواص الكهركيميائية

### Electrochemical Properties

نخزل المادة الكيميائية  $M_{ox}^{Z+}$  إلى المادة الكيميائية الأخرى  $M_{red}^{Z-n}$  حسب معادلة الاتزان التالية :



وإذا طبقنا معادلة نيرنست على المعادلة (7-26) حصلنا على ما يلي :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{M_{ox}^{Z+}}{M_{red}^{Z-n}} \right] \quad (7-27)$$

ويرمز القوس المربع إلى النشاط الكيميائي لكل من  $M_{ox}^{Z+}$  و  $M_{red}^{Z-n}$  ، وأن  $E^0$  جهد الخلية المعياري . ولا يعتمد جهد التأكسد والاختزال  $E$  على التراكيز الكلية للمواد ويعتمد فقط على النسبة بين المواد المتأكسدة والمختزلة . ولقد ثبت هذا عملياً من خلال التجارب التي أجريت على تراكيز شحيحة للأيونات وعلى تراكيز كبيرة وأظهرت أن لهما نفس التصرف . فمن الممكن إجراء تجارب تفاعلات التأكسد والاختزال في المحاليل باستخدام التراكيز الشحيحة من المواد المشعة .

ويستخدم التحليل الكهربائي في الترسيب الكهربائي لمعدن شحيح على قطب ما . وفي هذه الحالة نقتصر إلى الانتقائية في الترسيب الكهربائي عند جهد مضبوط والموجودة عند التعامل مع التراكيز العالية من الأيونات . وتحتير قيمة النشاط للمواد الموجودة بكميات شحيحة من القيم المجهولة حتى لو كان التركيز معروف ، وذلك لاعتماد معامل النشاط على تصرف نظام الإلكترونات ولايت المختلط ذو النظرية الكيميائية الفقيرة لحد الآن . إضافة إلى ذلك فإنه من الصعب تحديد تركيز المواد الشحيحة في المحلول نتيجة لاحتمالية الامتزاز وتكون معقدات مع الشوائب والتي تؤدي إلى نقص في

التركيز . وعلى الرغم من كل هذا تستخدم معادلة فرنست بجزء في حساب الظروف الضرورية لترسيب المعادن الشحيحة كهربائياً على الأقطاب .  
كما يمكننا ترسيب مواد غير ذائبة على الأقطاب ، فعلى سبيل المثال ينتج عن التحليل الكهربائي محلول فلوروسليكات تركيز عال من أيون الفلوريد على القطب مما يؤدي إلى ترسيب طبقة متجانسة ورقيقة من  $UF_4$  .

## 7-9 طرق فصل المواد الشحيحة التركيز

### Tracer Separation Methods

تستخدم كل طرق التحليل المستخدمة في الكيمياء التقليدية في فصل وعزل العناصر والمركبات المشعة . وفي العادة نحتاج إلى إضافة كمية كبيرة من نظير حامل، إلا أن هناك بعض طرق التحليل الخاصة في فصل وعزل العناصر شحيحة التركيز الخالية من الحامل . ومن هذه الطرق الاستخلاص بالمذيب وأنواع مختلفة من كروماتوغرافيا التجزئة نظراً لانتقائيتها وسهولتها وسرعتها .

## 7-9-1 الاستخلاص بالسائل-السائل

### Liquid-Liquid Extraction

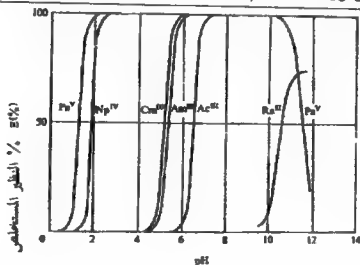
يعرف الاستخلاص بالسائل-السائل (أو بالمذيب) على أنها طريقة للنقل الانتقائي لمواد من مخلوط في محلول مائي إلى طبقة عضوية من خلال التوصل إلى اتزان بين الطبقة المائية ومذيب عضوي ذو تكوين مناسب . ويحوي الطور العضوي في العادة على مادة المستخلص A والتي تكون المركب المتبادل  $MA_n$  مع المادة M، والتي مستقل من الطور أو الطبقة المائية . ولقد دروسنا في (3-4-7) بعض الشروط اللازمة لاستخلاص المعادن . وكثيراً ما يصاحب المركب المتبادل الماء أو مادة متعادلة أخرى .

وفي حال كانت المادة غير الماء كسبت الصيغة كما يلي  $MAN_2S_8$  وترمز S إلى المادة المضافة . وتلعب المذبية وناتج الإضافة دور مهم في استخلاص مركبات المعادن .

تستخدم المحاليل العضوية للأمينات الثنائية في استخلاص الأيونات السالبة والمحاليل العضوية لقوسفات الألكيل والقوسفات وثاني الكبريتات في استخلاص الأيونات الموجبة . ويوزم للجزء (الكس) المستخلص عند تساوي حجم الطورين بـ  $E$  والتي تساوي :

$$E = D(D+1)^{-1} \quad (7-28)$$

ولقد عرفنا  $D$  فيما سبق (معادلة 15-7) ، وتغير قيمة  $D$  مع تركيز المواد ومكونات المذيبات ودرجة الحموضة والقوة الأيونية للطور المائي ودرجة حرارة النظام ... إلخ . وبين الشكل (11-7) الاستخلاص لعدد من المعادن إلى الكلوروفورم بواسطة 8-هيدروكسي كوينولين . وتستخدم هذه المنحنيات في تحديد أفضل ظروف الفصل .



شكل 11-7 : علاقة نسبة النظم المستخلص من محاليل الترات المائية التي لها درجات حموضة مختلفة بواسطة 0.1 جـ 8-هيدروكسي كوينولين (أو كرين) في الكلوروفورم .  $pH_{1/2}$  لـ  $V(IV)$  و  $Fe(III)$  هي 0.5 ولـ  $U(VI)$  2.6 ولـ  $Th(IV)$  3.1 .  $pH_{1/2}$  هي درجة الحموضة التي يستخلص عندها 50%



## 7-9-2 كروماتوغرافيا التبادل الأيوني

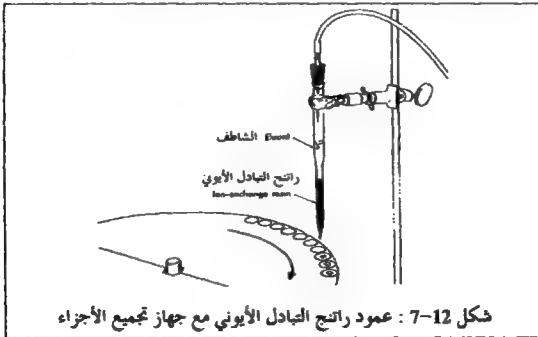
### Ion Exchange Chromatography

تتكون راتنجيات التبادل الأيوني العضوية الصلبة من شبكة بوليمرية عضوية تحتوي هذه الشبكة على مجموعات حامضية أو قاعدية مرتبطة مع الهيكل العضوي. ويكتب تفاعل الاستبدال الكلي الحاصل في المبادلات الأيونية الموجبة الحامضية كما يلي :



$$K_{ex} = \frac{[MR_{n(resin)}][H^{+}_{(aq)}]^n}{[M^{n+}_{(aq)}][RH]_{resin}^n} \quad (7-30)$$

ويعتمد ثابت الاتزان لهذا التفاعل (7-29) على الخواص النوعية لمادة التبادل الأيوني ، مثل كمية الوصلات المستعرضة في الشبكة البوليمرية وعلى حدود انحلال قطيعة أيون المعدن والقوة الأيونية للمحلول ودرجة الحرارة ... إلخ . ويزداد التميز في الطور الناتج مع تكافؤ الأيون الموجب ، فلهذا تقتصر الأيونات متعددة التكافؤ بقوة أكثر من ثنائية التكافؤ أو أحادية التكافؤ .



وعملياً تتميز المادة المشعة في الطبقة العليا من العمود المخوي على راتنج التبادل الأيوني الموجب أو السالب معتمدة على نوع الراتنج المستخدم . بعد ذلك يتم شطفها . لإزالتها من الراتنج بمحلول يمر عبر عمود الراتنج يسمى بالشايطف (eluant) (شكل 7-12) . وقد يتم الشطف باستخدام أيون لمعدن آخر (مثل  $M^{3+}$ ) ، والذي يؤدي إلى إزاحة اتزان تفاعل التبادل من خلال المنافسة مع  $M^{+}$  على المواقع في الراتنج ، أو من خلال إضافة أيون تعقيد سالب إلى المحلول فيرتبط مع  $M^{+}$  ويؤدي إلى نقصان في تركيز  $M^{+}$  وهذا سيؤدي إلى إزاحة الاتزان (معادلة 7-29) إلى اليسار . وبين الشكل (7-13) ترتيب الشطف الناتج عن فصل الأكتانيدات والأكثانيدات موجبة الشحنة من عمود راتنج التبادل الأيوني الموجب باستخدام عميل تعقيد **Complexing agent** .



شكل 7-13 : شطف أيونات اللانثانيدات والأكثانيدات الثلاثية الموجبة . استخدم راتنج التبادل الأيوني Dowex-50 مع  $\alpha$ -هيدروكسي أيزوبيوتيرات الأمونيوم كشايطف

ولقد استخدم راتنج التبادل الأيوني الموجب كثيراً في فصل وإثبات الشخصية الكيميائية للعناصر التي تأتي بعد البلوتونيوم .

### 3-9-7 كروماتوغرافيا الفصل العمودي

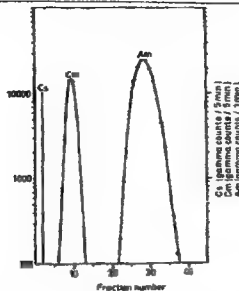
#### Column Partition Chromatography

ينظر العلماء إلى هذه الطريقة على أنها استخلاص سائل-سائل إلا أنها تتميز بوجود أحد أطوار السائل ثابتاً ومعلقاً بمادة داعمة والطور الآخر متحركاً .

وأما كروماتوغرافيا الفصل السائل

#### Liquid partition chromatography (LPC)

فإنها تنفذ من خلال ثبات أحد الأطوار ، المائي أو العضوي ، وفي حال كان الطور العضوي هو الثابت سميت هذه الطريقة بكروماتوغرافيا الفصل السائل ذو الطور العكسي **Reversed phase** ويثبت الطور المائي من خلال امتزازه على جل السليكا أو مسحوق السيليلوز ... إلخ. ولتثبيت الطور العضوي تستخدم كرات صغيرة (50-200 مايكرومتر) من بولي فينيل كلورايد PVC أو التفلون ... إلخ . وتظهر فائدة LPC الطور العكسي في الكيمياء المشعة لفصل عناصر الأكتينيدات والأكتانيدات كل على حده أو عن بعضها البعض ، ويتكون الطور الثابت فيها من ثلاثي بيوتيل الفوسفات (TBP) أو ثنائي - 2- إيثيل هكسيل حامض الفوسفوريك (HDEHD) ... إلخ .



شكل 14-7 : فصل الأمريسيوم والكوريوم بواسطة كروماتوغرافيا الفصل ذو الطور العكسي ، واستخدام نوات ثلاثي لوريل أمين ( $\text{TLMANO}_3$ ) الممتز على Kel-F مع الشايف 4 جـ  $\text{LiNO}_3$  عند  $\text{pH} = 2.0$

ويثبت الطور الثابت في مكان في العمود تماماً كما في التبادل الأيوني . ويبين الشكل (14-7) عملية فصل  $\text{Am}^{3+}$  من  $\text{Cm}^{3+}$  بواسطة LPC الطور العكسي . وتزداد سعة وفعالية هذه الطريقة من خلال العمل تحت ضغط (30-400 ضغط جوي) ودرجة حرارة عالية وباستخدام داعم مقسم إلى دقائق ناعمة جداً (5-10 ميكرومتر) .

#### 4-9-7 كروماتوغرافيا الفصل الطبقي

##### Sheet Partition Chromatography

تستخدم هذه الطريقة صفحة من الورق لدعم الطور الثابت (الكروماتوغرافيا الورقية) أو مادة ممتزة مطلية على لوحة من الزجاج (كروماتوغرافيا الطبقات الرقيقة) . ولهذا الطريقة ميزة على طرق الفصل بالعمود

وذلك لأنه من السهل التعرف على موقع المواد المشعة إما بواسطة التصوير الإشعاعي الآلي أو بواسطة أجهزة المسح .

تشتمل طريقة عمل الكروماتوغرافيا الورقية على الخطوات التالية :

- ( أ ) توضع عدة قطرات من المادة المراد فصلها (أيون معدن أو جزيء عضوي ... إلخ) على بُعد بضع سنتيمترات من نهاية القطعة الورقية .
  - ( ب ) تعلق القطعة الورقية عمودياً ويغمر أسفلها بإخلول بحيث تكون النقاط التي وضعت في ( أ ) في أسفلها وفوق مستوى الإخلول .
  - ( ج ) تلتفح الخاصية الشعرية بالإخلول إلى أعلى إلى أن يلامس المواد الممتزة الموضوعة في ( أ ) .
  - ( د ) تتحرك المواد من نقطة البداية مع الإخلول إلى أعلى ، وتحمد المسافة المقطوعة على نوع الورق والإخلول المستخدم والخواص الكيميائية للمادة .
- ويعطى لكل مادة قيمة  $R_f$  خاصة بها وتساوي :

$$R_f = \frac{\text{المسافة التي يقطعها المركب المقصود}}{\text{المسافة التي تقطعها مقدمة السائل}} \quad (7-31)$$

ويستخدم في حال الأيونات المعدنية مخلوط من الأميون و HCl المخفف ، وأما في حال المواد العضوية فيستخدم خلوط من الفينول والماء أو من أستيل أسيتونات والماء . وبين الشكل (4-7) هذه الطريقة بالتفصيل .

تستخدم طريقة كروماتوغرافيا الفصل الطبقي الرقيق بطريقة (TLC) Thin layer partition chromatography مماثلة للكروماتوغرافيا الورقية . كما أن لها استخدام واسع لأنها غير محدودة لدعم السيلولوز . وتثبت أي مادة ممتزة على شكل طبقة رقيقة (1-5 ميكرومتر) على لوحة من الزجاج كجمل السليكا والسيلولوز الناعم والمسحوق والألومينا ... إلخ .

كما يستخدم في بعض الأحيان مجال جهد كهربائي لتحسين الفصل (الكروماتوغرافيا electrophoresis) وخاصة في الفصل الانتقائي للسكريات والأملاح الأيونية .

## الأسئلة :

(1) أخذ 15.0 مل من دم مريض ما وخلطت مع حجم صغير جداً من  $\text{Na}_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$  ذو النشاط النوعي العالي . بعد ساعة من الخلط حيث تأخذ كريات الدم الحمراء كل  $^{32}\text{P}$  . أخذ 1 مل من المخلوط فوجد أنه يحتوي على 216000 تحلل/دقيقة (عد/دقيقة) . ثم حقن المريض بخمس ملييلتر من المخلوط وانتظرنا نصف ساعة ، بعدها سحبت عينة جديدة فوجد أن لكل 10 مل منها 2300 تحلل/دقيقة . احسب حجم الدم في جسم المريض .

(2) أخذ 1 مل من مخلوط من أحماض أمينية (الكثافة 1 غم/مل) وأضيف إليه 2.61 ملغم من السيستين الموسوم  $^{32}\text{S}$  والذي له نشاط نوعي 0.862 ميكروكوري/ملغم . بعد ذلك فصل 30.6 ملغم من السيستين النقي من المخلوط الكلي ووجد أن لها نشاطاً إشعاعياً يساوي 169000 تحلل/الدقيقة وبقاعلية كشف 27٪ . ما هي نسبة السيستين في المخلوط الأصلي ؟

(3) أخذت عينة من الدهان وأذيت في حامض النيتريك المركز ثم أضيف إلى المحلول 5 مل من محلول  $^{212}\text{Pb}$  . وبعد تبخير الحامض الزائد أضيفت كمية زائدة من 1 ج  $\text{NaCl}$  ثم سخن المحلول ورشح . وبعد أن برد المحلول وتبلور  $\text{PbCl}_2$  ، أخذ 0.3276 غم من البلورات لقياس النشاط الإشعاعي فوجد أنها تعطي 185160 تحلل/ 5 دقائق . وأما 1 مل من محلول  $^{212}\text{Pb}$  الأصلي فله 57000 تحلل/دقيقة والإشعاع الخلفي له 362 تحلل/دقيقة . احسب نسبة  $\text{Pb}$  (الرصاص) في الدهان .

(4) ما هي أصغر كمية من الأنديم ( $\text{In}$ ) يمكن تحديدها في 100 ملغم من الأنيوم باستخدام  $\text{NAA}$  والذي له فيض من النيوترونات يساوي  $10^{12}$  نيوترون/ثانية. سم<sup>2</sup> . افترض أن لـ  $^{27}\text{Al}$  و  $^{115}\text{In}$  نفس القدرة على إمساك النيوترونات ، فلنفاعل  $^{115}\text{In} \xrightarrow{(r,n)} ^{116}\text{In}$  ( $\sigma = 45\text{b}$ ) ، وإن أقل نشاط لـ  $^{116}\text{In}$  يمكن الكشف عنه 10

تحلل/ثانية ، وأن لا يصعدى التشويش من  $^{28}\text{Al}$  ما نسبته 20% .

(5) أخذت عينة من شهب ، ودرست لتحديد كمية الجاليوم في حديد الشهب .  
فأخذ 373.5 ملغم من حديد الشهب ( أ ) و 10.32 ملغم أو كسنيات الجاليوم (ب)  
وتم تشعيمهما في مفاعل لمدة 30 دقيقة . وبعد فترة تبريد أخذ ( أ ) وأذيب في  $\text{HCl}$   
المركز وأضيف إليه 4.53 ملغم من  $\text{Ga}^{3+}$  غير المشع . بعد ذلك أجريت بعض  
الخطوات الكيميائية ونجم عن ذلك ترسيب 25.13 ملغم من أو كسنيات الجاليوم ( أ ) .  
ثم أخذت العينة (ب) وأذيت وأضيف إليها الماء إلى 50 مل ، ثم سحب 0.50 مل  
وأضيف إليه 4 ملغم من  $\text{Ga}^{3+}$  غير المشع ورسبت أو كسنيات الجاليوم ( د ) ، فإذا  
أعطى منحنى التحلل الإشعاعي خطين مستقيمين،  $\log R_2 = 3.445 - 0.0213t$  ، فما هي كمية الجاليوم في العينة ( أ ) .

(6) أخذ 10 غم من يودو البنزين وخلطت مع 100 مل من 1 جـ  $\text{KI}$   
اخترى على 2500 تحلل/دقيقة من  $^{131}\text{I}$  لمدة ساعتين . ثم فصل يودو البنزين فوجد  
أن له نشاطاً إشعاعياً يساوي 250 عد/دقيقة ، فما هي نسبة ذرات اليود في يودو  
البنزين والتي تم استبدالها مع محلول اليوديد .

(7) احسب ثابت التوزيع لمركب أستيل أميتونات البلوتونيوم المتعادل بين

( أ )  $\text{CHCl}_3$  و 0.1 جـ  $\text{NaClO}_4$  .

(ب) مثل إيزويوتل كيتون و 0.1 جـ  $\text{NaClO}_4$  .

(ارجع إلى الشكل 5-7) .

(8) اقترح العلماء طريقة بسيطة لحساب ثوابت الاستقرار  $\beta_n$  مستخدمين

العلاقات التالية :

$$K_n = \frac{\beta_n}{\beta_{n-1}} = [A_n]_{t=n-0.5}^{-1}$$

$$\bar{n} = N - d(\log D)/d(\log [A_n])$$

و

وفي حال  $Pu^{4+}$  فإن  $N=4$  .

قدر قيم  $\beta_n$  مستخدماً منحني البنزين في الشكل (5-7) .

(9) أراد أحد الأشخاص حساب حجم السائل المتبقي في خزان ترسيب مغلق حجمه الكلي 80 م<sup>3</sup> ومستخدماً في ترسيب  $CaSO_4$  . فأضاف 0.5 مل من  $^{24}Na_2SO_4$  (نشاطه النوعي  $3.2 \times 10^8$   $\frac{\text{تطل}}{\text{نقطة.مل}}$ ) إلى الخزان وبعد ساعتين من الترسيب أخذ 10 مل وقيس النشاط الإشعاعي لها فوجد أنه يساوي 500 تحلل/10 دقائق . احسب حجم السائل الخُر في الخزان .

(10) احسب جهد الترسيب المخرج  $(E-E^0)$  لـ  $10^{-12}$  جـ من  $^{210}Bi$  على قطب من الذهب من معادلة نرنست ، علماً بأن النشاط الكيميائي لمعدن الزموت يساوي واحد .

(11) يحتوي خام ما على اليورانيوم وكمية صغيرة من الفناديوم ، ولتحديد تركيز الفناديوم لأهد من فصله عن اليورانيوم . فإذا استخدم الاستخلاص بالمذيب و0.1 جـ 8-هيدروكسي كريتولين في الكلوروفورم ، فأَي منهم سيتخلص من الآخر ؟  
وعند أي درجة حموضة pH ؟ . (ارجع إلى الشكل 11-7) .

(12) يحتوي أحد أنظمة الاستخلاص بالمذيب على اليورانيوم واللائثانوم في 1 جـ  $HNO_3$  و 100% TBP ، وكانت قيمة  $D_u = 20$  وقيمة  $D_{La} = 0.07$  .

فإذا كانت نسبة الأطوار  $\theta = \frac{\text{حجم العضوي}}{\text{حجم المقي}} = \frac{V_{org}}{V_{aq}} = 0.5$  ، فكم كمية

اليورانيوم المستخلص من الطور المائي من خلال ثلاث عمليات استخلاص ؟ وكم كمية اللائثانوم المستخلص مع اليورانيوم ، علماً أن الجزء (الكسر) المستخلص باستخدام  $n$  حجم عضوي ( $V_{org}$ ) من حجم مائي واحد ( $V_{aq}$ ) يساوي :

$$E_n = 1 - (1 + D\theta)^{-n} \quad (7-32)$$



## الفصل الثامن

### الطاقة النووية

#### NUCLEAR ENERGY

##### 8-1 مقدمة

بعد أن اكتشف العلماء هامان وسزاسمن وميتر الانشطار النووي لليورانيوم بالنيوترونات وأن عدد النيوترونات المنطلقة من الانشطار أكثر من واحد ، فكر الكثير منهم ببناء أنظمة تفاعل متسلسل للحصول على كمية كبيرة من الطاقة النووية تحت ظروف مسيطر عليها . ولقد بني أول هذه الأنظمة في مدينة شيكاغو الأمريكية في بداية عام 1940 بقيادة العالم أي . فيرمي . وفي عام 1942 أصبح هذا المفاعل النووي جاهزاً للعمل كجزء من مشروع منهاتن **Manhattan Project** . ومنذ ذلك الوقت بني المئات من المفاعلات النووية في جميع أنحاء العالم للأبحاث أو لإنتاج البلوتونيوم أو لإنتاج الطاقة . ولقد بلغ عدد محطات توليد الطاقة النووية 218 في عام 1978 وبقوة 103 GWe ، وموزعة كالتالي : 69 في الولايات المتحدة الأمريكية (486 GWe) و82 في أوروبا الغربية (30 GWe) و27 في ما كان يعرف بالاتحاد السوفياتي (7 GWe) . وهناك الآن 380 محطة (360 GWe) تحت البناء أو التصميم .

ولقد بلغت مساهمة الطاقة النووية في إنتاج الكهرباء بحوالي 22٪ في السويد و17٪ في الولايات المتحدة و7٪ في المملكة المتحدة . ولقد وقعت بعض الحوادث المميتة في هذه المحطات منها ما حدث في محطة جزيرة الأميال الثلاثة (الولايات المتحدة) ومحطة تشرنوبل (الاتحاد السوفياتي سابقاً وأوكرانيا اليوم) .

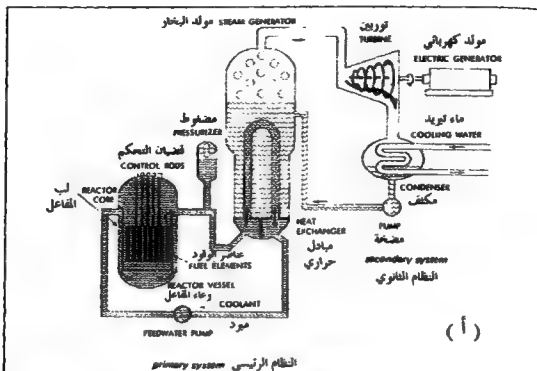
## 8-2 المفاعل النووي The Nuclear Reactor

إذا تمعنا النظر في تفاعل الانشطار التالي :

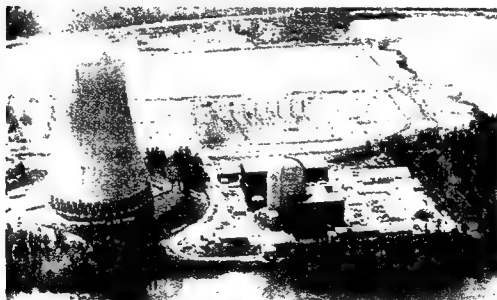


وجدنا أن هناك زيادة في عدد النيوترونات في النواتج ، فمقابل كل نيوترون يستهلك ينتج في المعدل حوالي 2.5 نيوترون ( $\nu = 2.5$ ) . ويمكن استخدام النيوترونات الجديدة في انشطار ذرات أخرى من  $^{235}\text{U}$  مما سيؤدي إلى إنتاج المزيد من النيوترونات . ويتم التحكم في تفاعلات الانشطار المتسلسل التي تجري في المفاعلات النووية ، أي أن هناك حالة من الاتزان فمقابل كل انشطار يُستخدم نيوترون واحد فقط من النيوترونات الجديدة لمزيد من الانشطار ، أي أن معامل التكاثر للنيوترونات K في هذه الظروف يساوي واحد . وإذا ازداد المعامل ازداد عدد النيوترونات وبالتالي سرعة الانشطار زيادة أسية . وفي حال غياب آلية للتحكم فإن الحرارة الناتجة ستدمر في النهاية نظام التفاعل المتسلسل والمفاعل النووي كما حدث في محطة تشرنوبل . فلا بُد من توفر عدة آليات للتحكم في المفاعلات النووية للمحافظة على السلامة . ولا تستخدم هذه الآليات في الأسلحة النووية التي يسعى صانعوها لجعل تفاعلاتها أشد عنفاً .

وهناك مرونة كبيرة في اختيار التصميم لمفاعل التسلسل النووي المتحكم به وذلك لأن لكل من التصميمات فوائد وعيوب . وفي الواقع هناك أكثر من 12 نوعاً من محطات الطاقة النووية تم تطويرها وتعمل بشكل ممتاز . 90٪ منها مفاعلات ماء خفيف (LWR) Light Water Reactor . وسوف ندرس مبدأ ومكونات هذا النوع بالتفصيل . وبين الشكل (8-1) مخطط وصورة لمفاعل ماء خفيف . والمكون الرئيسي لأي مفاعل يسمى بلب المفاعل الذي يحتوي على الوقود النووي القابل للانشطار . ويتكون هذا الوقود عادة من  $\text{UO}_2$  المخصب باليورانيوم-235  $^{235}\text{U}$  إلى 2-3٪ والموضوع في قضبان مغلقة بسبيكة من الزركونيوم . وترتبط قضبان الوقود في مجموعات مكونة عناصر الوقود أو مكان التجميع .



(أ)



(ب)

شكل 1-8 : (أ) أجزاء المفاعل الرئيسية والثانية لمفاعل الماء الخفيف المضغوط (PWR) (ب) محطة تروجان في الولايات المتحدة

تنتقل نواتج الانشطار بعد حدوثه في الوقود النووي بطاقة حركية عالية تخسرها من خلال التصادمات مع ذرات المواد المحيطة بها ، وهذا سيؤدي إلى تحويل الطاقة من حركية إلى حرارية . ومن أجل المحافظة على درجة حرارة تشغيل مستقرة في المفاعل لأبد من استخدام ما يعرف بالمبرد **Coolant** . وتستخدم مفاعلات الماء الخفيف "الماء الخفيف"  $H_2O$  كمبرد يدخل من أسفل لب المفاعل ويسخن من خلال مروره على طول قضبان الوقود ثم يخرج من أعلى اللب على هيئة ماء ساخن سخونة زائدة كما في مفاعلات الماء المضغوط **Pressurized Water Reactors (PWR)** (شكل 1-8) أو على هيئة بخار ماء له درجة حرارة عالية كما في مفاعلات الماء المغلي **(BWR)** **Boiling Water Reactor** ويتولد البخار في **BWR** في مبادل حراري منفصل . ويدير البخار الناتج توربينات موصولة إلى مولدات كهربائية ومن ثم يتكثف في نظام تبريد خارجي موجود في الجهة الخلفية من التوربينات . وقد يكون نظام التبريد الخارجي نهر أو بحيرة أو أبراج تبريد . ويتكون نظام جريان الماء والبخار من دورات مغلقة كما في الشكل (1-8) .

وتستخدم للتحكم قضبان مصنوعة من مواد كالكاديميوم تمكن من السيطرة على سرعة الانشطار المتسلسل النووي . وذلك لأن لهذه المواد قدرة عالية على الإمساك بالنيوترونات وإبطاء التفاعل المتسلسل .

ومن أجل الحصول على الحد الأقصى لقطع الانشطار المستعرض والذي يصل إلى أعلى قيمة له عندما تكون النيوترونات ذات طاقة منخفضة ، ولهذا فلا بُد من أن نبطئ النيوترونات ذات الطاقة العالية بواسطة مواد مهدنة **Moderator**

والتي تعمل على التشتت المرن للنيوترونات دون الإمساك بها . ويقوم الماء في مفاعلات الماء الخفيف LWR's بالتبريد والتهدئة في وقت واحد .

وتستخدم بعض أنواع المفاعلات النووية الأخرى مواداً مهدنة صلبة كالغرافيت ووسط تبريد غازي كالهيليوم . وتسمى المفاعلات التي يكون فيها فصل مادي بين الوقود والمهدئ بالمفاعلات غير المتجانسة ، والمفاعلات التي يذوب فيها الوقود مباشرة بالمواد المهدنة بالمفاعلات المتجانسة .

يُطَوَّق نظام لب المفاعل بخزان من الفولاذ ، كما يحاط بخزان المفاعل بدرع بيولوجي سميك لحماية العاملين فيه من النيوترونات وإشعاعات جاما المنطلقة من الانشطار . ويُطَوَّق مبنى المفاعل تماماً من جميع الجهات ببناء خارجي لمنع تسرب أي نشاط إشعاعي ينجم عن أي حادث طارئ إلى المنطقة المحيطة بالمفاعل . كما تتم مراقبة وتنقية مخرجات المفاعل من ماء وهواء من الملوثات المشعة .

ولا يستهلك الوقود النووي  $^{235}\text{U}$  100% في المفاعلات . ويؤدي الانشطار إلى إنتاج نواتج الانشطار ، وبعض هذه النواتج مقطع عرضي لإمساك النيوترونات عالٍ جداً ( $b100$ ) أي أنها ستنافس تفاعل الانشطار المتسلسل على النيوترونات. وقبل أن يصل المفاعل إلى حالة التسمم من قبل نواتج الانشطار هذه، لابد من تغيير عناصر الوقود في المفاعل ، وتتم عملية التغيير بواسطة آلة شحن الوقود . ونظراً لوجود كميات كبيرة من نواتج الانشطار المشعة يسمح لعناصر الوقود المستعملة بأن تبرد لعدة أشهر (وذلك بالنسبة للحرارة والنشاط الإشعاعي) في أحواض تخزين مملوءة بالماء وموجودة في مبنى المفاعل (شكل 1-8).

وقد تستخلم عناصر الوقود المستعملة بعد ذلك في ما يسمى بعملية إعادة التصنيع أو المعالجة **Reprocessing** لاستعادة الكمية المتبقية من المواد الانشطارية . وأي مواد قابلة للانشطار ، وتعني بالمواد القابلة للانشطار هي تلك الذرات التي قد تتحول إلى ذرات قابلة للانشطار من خلال الإمساك أو التقاط النيوترونات الناتجة عن الانشطار مثل  $^{232}_{90}\text{Th} \xrightarrow{\beta^-} ^{232}_{91}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{232}_{92}\text{U}$  و  $^{238}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{238}_{93}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{238}_{94}\text{Pu}$  .

تفصل عملية المعالجة الكيميائية نواتج الانشطار ، والتي قد يكون لبعضها أهمية كبيرة لتعزل . ومع ذلك فتخزن معظم نواتج الانشطار كفضلات نووية مشعة . وأما المواد الانشطارية التي تم استردادها فيعاد استخدامها كعناصر ووقود نووي .

## 8-2 انطلاق الطاقة في الانشطار

### Energy Release in Fission

إذا أمعنا النظر في الانشطار لليورانيوم 235 بالنيوترونات الحرارية تبين لنا ما يلي :

طاقة شظايا الانشطار الحركية 165 MeV (في المعدل) .

طاقة 2.5 نيوترون (فوري) الحركية 5 MeV .

طاقة أشعة جاما الفورية 7 MeV (في المعدل) .

أي أن مجموع الطاقة المنطلقة الفورية حوالي 177 MeV ، وهذه الطاقة

تتص من قبل المواد المحيطة بالانشطار . جدول (1-8) .

	232U	233U	235U	238U	Nat. U	239Pu	240Pu	241Pu
Radioactive decay	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$		$\alpha$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$
Half-life (years)	$1.405 \times 10^{10}$	$1.59 \times 10^5$	$7.04 \times 10^8$	$4.47 \times 10^9$	-	$2.44 \times 10^4$	$6.54 \times 10^3$	14.9
Specific rad. act. (dps $\mu g^{-1}$ )	$4.06 \times 10^{-3}$	357	0.0800	0.01244		2270	8430	$3.69 \times 10^4$
Thermal neutrons (0.025 eV)								
n, $\gamma$ -capture ( $\sigma$ , barns)	7.40	48	99	2.70	3.42	269	290	368
fission ( $\sigma$ , barns)	-	531	582	< 0.5 mb	4.18	742	0.030	1009
neutron yield ( $\nu$ )	-	2.49	2.42	-		2.87	2.90	3.00
fission factor ( $\eta$ )	-	2.29	2.07	-	1.33	2.11		2.15
Fast neutrons (-0.25; ~1.0 MeV)								
n, $\gamma$ -capture ( $\sigma$ , barns)	0.18; 0.15	0.39; 0.08	0.24; 0.11	0.14; 0.17	0.16; 0.18	0.27; 0.09	0.20; 0.18	
fission ( $\sigma$ , barns)		2.25; 1.95	1.35; 1.25	0.017	0.11	1.62; 1.65	0.11; 1.59	1.65
neutron yield ( $\nu$ )		2.52; 2.59	2.49; 2.58	2.85		2.93; 3.02		2.47; 3.3
عدد النيوترونات الناتجة								
fission factor ( $\eta$ )		2.29; 2.45	2.12; 2.39			2.53; 2.88		

جدول 1-8 : النوى القابلة للإشطار والمعلومات الخاصة بها .

تتميز نواتج الانشطار بأن لها نشاطاً إشعاعياً وأنها تتحلل من خلال إطلاقها لأشعة بيتا وجاما وإكس ، وتقدر طاقة التحلل الكلية لها بحوالي 23 MeV . يتسرب منها حوالي 10 MeV على شكل إشعاعات خارج المفاعل ويبقى حوالي 1 MeV من طاقة التحلل في قضبان الوقود في المفاعل ، وأما الباقي والذي يقدر بحوالي 12 MeV من طاقة تحلل بيتا وجاما والمقسوم تقريباً بالتساوي بين  $\bar{E}_\beta$  و  $E_\gamma$  فيمتص في المفاعل . كما تلتقط النيوترونات الفورية من قبل مادة المفاعل مطلقة طاقة ربطها والتي تقدر بحوالي 10 MeV . وبهذا فإن كمية الطاقة المنطلقة من كل انشطار تساوي تقريباً  $10 + 12 + 177 = 199 \text{ MeV}$  . وأما معدل القيمة العملي المستخدم فيسوي 200 MeV/انشطار .

$$E_f = \text{انشطار} / 200 \text{ MeV} = 3.20 \times 10^{-11} \text{ جول} \quad (8-2)$$

$$\text{وعلى هذا فإن } \frac{1}{3.2 \times 10^{-11}} \approx 3.1 \times 10^{10} \text{ انشطار/ثانية .}$$

وهذا سيؤدي إلى إنتاج واحد واط من حرارة المفاعل . وتكتب معادلة الطاقة الحرارية لمفاعل كما يلي :

$$P = E_f \Delta N_f / \Delta t \quad (8-3)$$

حيث أن  $\frac{\Delta N_f}{\Delta t}$  عدد الانشطارات في الثانية . فإذا أنتجت محطة طاقة نووية

3 غيغا واط من الحرارة (أو  $\text{GW}_{\text{Th}}$ ) ( $\text{Th} = \text{Thermal} = \text{حراري}$ ) نتج عن ذلك (1 GWe) واحد غيغا واط من الطاقة الكهربائية ، أي بفعالية 33% . ويقدر عدد الانشطارات اللازمة لذلك بحوالي  $8.1 \times 10^{24}$  انشطار/اليوم . وبما أن كتلة ذرة اليورانيوم تساوي  $\frac{M}{N_A} = 3.9 \times 10^{-22} \text{ غم}$  ، فإن كتلة اليورانيوم المنشطرة متساوي :  $8.1 \times 10^{24} \times 3.9 \times 10^{-22} = 3160 \text{ غم } ^{235}\text{U}$  /اليوم .



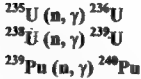
والكمية الحقيقية المستهلكة أعلى من هذا بقليل .

### 8-3 احتمالية الانشطار Fission Probability

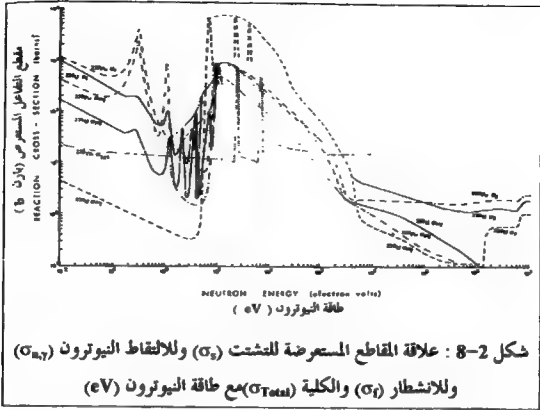
نتيجة لتشجيع اليورانيوم بالنيوترونات تحدث عدة تفاعلات بالإضافة إلى التقاط النيوترون والانشطار  $(n,f)$  مثل التشتت و  $(n,\gamma)$  و  $(n,2n)$  ... إلخ . وهذه التفاعلات كلها مهمة لمصمم المفاعل وللكيمائي النووي الذي سيتولى عملية التعامل مع عناصر الوقود النووي المستعمل . وتعتمد احتمالية حدوث أي من هذه التفاعلات على طاقة النيوترون ، ويوضح الشكل (2-8) وجود ثلاث مناطق هي:

(1) إذا كان معدل الطاقة الحركية للنيوترونات الحرارية  $\bar{E}_n \leq 1\text{eV}$  هيمن انشطار  $^{235}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  على التقاط النيوترونات  $(\sigma_f > \sigma_{n,\gamma})$  . وعلى الرغم من أن  $\sigma_{n,\gamma}$  لليورانيوم 238 صغير إلا أنه يحدث نتيجة لنسبة  $^{238}\text{U}$  العالية .

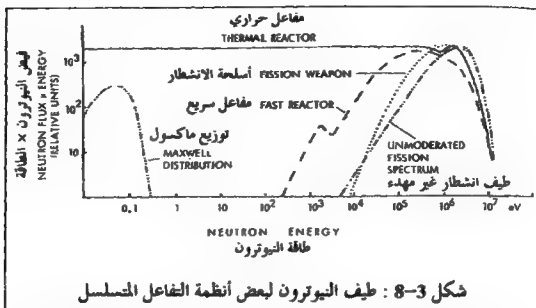
(2) يحدث للنيوترونات فوق الحرارية  $(1 \leq \bar{E}_n \leq 10^5\text{eV})$  التقاط مصحوباً بانطلاق إشعاعات كثيرة ورنين انشطاري . ففي هذه المنطقة تتكون نظائر أثقل من خلال تفاعلات  $(n,\gamma)$  ومن الأمثلة على ذلك :



(3) وأما النيوترونات السريعة  $(\bar{E}_n \geq 0.1\text{MeV})$  فلها مقاطع مستعرضة صغيرة نسبياً  $(1b \geq \sigma)$  . ويهيمن الانشطار على الالتقاط المصحوب بالإشعاعات . وتصبح قابلية  $^{238}\text{U}$  للانشطار أعلى كلما ازدادت طاقة النيوترونات .

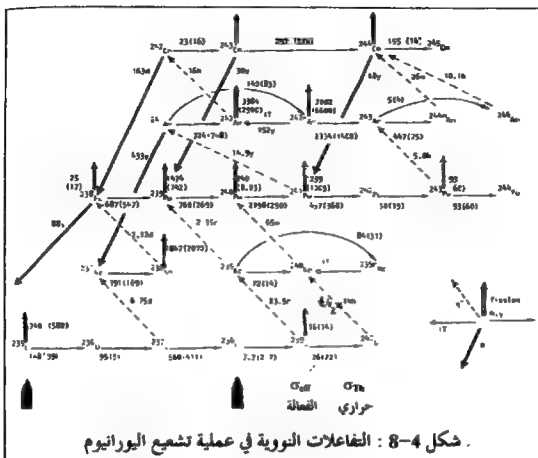


ومن الواضح أن لطيف النيوترون دور أساسي في المفاعل . وبين الشكل (8-3) طيف النيوترونات الفورية (غير المهدنة) الناتجة عن الانشطار والتي لها معدل طاقة يساوي  $\bar{E}_n \sim 2\text{MeV}$  . ويحدث غالبية الانشطار في الأسلحة النووية بواسطة النيوترونات السريعة ، كما يمكن تصميم وبناء المفاعلات النووية ، بحيث تستخدم النيوترونات بشكل رئيسي في الانشطار ، السريعة أو الحرارية منها . ويؤدي هذا إلى مفهومين مختلفين للمفاعلات ، أولهما المفاعل السريع وثانيهما المفاعل الحراري . ويوضح الشكل (8-3) طيف النيوترونات التقريبي لكل منهما . وسوف ندرس المفاعلات الحرارية لأهميتها في وقتنا الحاضر .



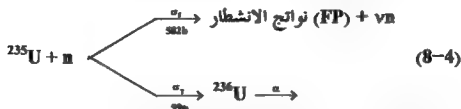
يفترض في المفاعلات الحرارية أن هناك اتزاناً حرارياً بين معظم النيوترونات وذرات المهدئ ، وفي واقع الأمر فإن لطيف النيوترون في مفاعلات الطاقة طاقة أكبر . ومن العلاقة  $E_n = kT$  نجد قيمة  $E_n$  عند درجة حرارة 300°م في مفاعل الماء الخفيف والتي تساوي 0.05 eV (شكل 8-3) . ومع ذلك فإن المقاطع المستعرضة لطاقة النيوترونات الحرارية ( $E_{th}$ ) قد تم معايرتها للنيوترونات أحادية الطاقة ذات سرعة 2200 م/ث . وهذا يقابل قيمة  $E_n = 0.025$  eV .

ويبين الجدول (8-1) قيم المقاطع المستعرضة عند تلك الطاقة . وتقدر المقاطع المستعرضة لمعظم الأنوية وليس لكلها عند قيم الطاقة المنخفضة للنيوترونات وخارج منطقة الرنين من القاعدة  $\frac{1}{v}$  حيث أن  $\left( \sigma \propto \frac{1}{\text{السرعة}} \right)$  . ونظراً لعدم وجود طيف طاقة واضح للنيوترونات الحرارية في المفاعلات الحرارية فلا بُد من استخدام المقاطع العرضية الفعالة لحساب الحصول الناتج من المفاعلات . وتتفاوت المقاطع المستعرضة من مفاعل إلى آخر . ويوضح الشكل (8-4) المقاطع المستعرضة الفعالة لمفاعل الماء الخفيف LWR المعروف .



## 8-4 عامل الانشطار Fission Factor

يستهلك  $^{235}\text{U}$  في المفاعلات الحرارية بطريقتين ، الأولى الانشطار والثانية الالتقاط المصحوب بالإشعاعات



ويتحلل  $^{236}\text{U}$  من خلال دقائق ألفا ، ونظراً لطول نصف عمره الذي يبلغ  $2.3 \times 10^7$  سنة فإنه يتجمع في المفاعل . وقد يلتقط  $^{236}\text{U}$  نيوترونات فيكون  $^{237}_{92}\text{U}$

والذي يتحلل في خلال عدة أيام معطياً  $^{237}\text{Np}$  . ويعتمد عدد النيوترونات  $v$  الناتج من كل انشطار على طاقة النيوترون ، وتقدر قيمة  $v$  في انشطار  $^{235}\text{U}$  الحراري بـ 2.42 نيوترون (الجدول 8-1) .

وإذا عرفنا النسبة التالية :

$$\alpha = \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_{\gamma}} = \frac{\sum f}{\sum f + \sum \gamma} \quad (8-5)$$

فإن احتمالية أن يؤدي التقاط النيوترون إلى انشطار تساوي :

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_{\gamma}} = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (8-6)$$

وإن عدد النيوترونات الناتج عن كل التقاط لنيوترون هو :

$$\eta = \frac{v}{1 + \alpha} \quad (8-7)$$

حيث أن  $\eta$  هو الناتج النيوتروني لكل امتصاص أو عامل الانشطار . ويتطلب التفاعل المتسلسل بشكل رئيسي قيمة لعامل الانشطار أكثر من واحد ( $\eta > 1$ ) . ويحتوي الجدول (8-1) على قيم عامل الانشطار للنوى المهمة . فإذا استخدمنا النيوترونات الحرارية كانت أعلى قيمة لـ  $\eta$  هي 2.29 في  $^{235}\text{U}$  وإذا استخدمنا النيوترونات السريعة كانت أعلى قيمة لـ  $\eta$  هي 2.88 في  $^{239}\text{Pu}$  .

وفي حال كانت هناك خليط من النظائر فلا بد من استخدام المقطع العرضي الماكروميكروبي  $\sum f$  في حساب  $\alpha$  (معادلة 8-5) . قيمة  $\sum f$  لليورانيوم الطبيعي هي  $\sum f = 0.71 \times 582$  لكل 100 وقيمة  $\sum \gamma = 99 \times 0.71 + 99.3 \times 2.70$  لكل 100 ، فحصل على قيمة لـ  $\alpha = 0.82$  و  $\eta = 1.33$  ، وهذا يعني إمكانية حدوث التفاعل المتسلسل في اليورانيوم الطبيعي .

## 8-5 الانشطار النووي Nuclear Fission

يعبر الانشطار النووي من التفاعلات النووية القوية ، حيث تنقسم النواة إلى قسمين متساويين أو غير متساويين وتطلق كمية كبيرة من الطاقة قدر بحوالي 200 MeV/انشطار . ومن أهم جوانب الانشطار التي دراست بالتفصيل ، توزيع الكتلة والشحنة بين الشظايا المتكونة في الانشطار . وبغض النظر عن كيفية حدوث الانشطار تتكون شظايا ذات كتل مختلفة وهذا يؤدي إلى إنتاج عناصر كيميائية تتراوح من الخفيف كالزنك ( $Z=30$ ) إلى الثقيل كالجنادوليوم ( $Z=64$ ) وبأنصاف عمر تتراوح من أجزاء من الثانية إلى ملايين السنين . ولقد تم التعرف على حوالي 400 نواة مختلفة من انشطار  $^{235}\text{U}$  بالنيوترونات . وتحتاج دراسة نواتج الانشطار إلى عمل كيميائي إشعاعي مكثف ، وهذا المجال من المجالات البحثية النشطة ، ومن أهم المشاكل البحثية قياس النواتج ذات نصف العمر القصير جداً .

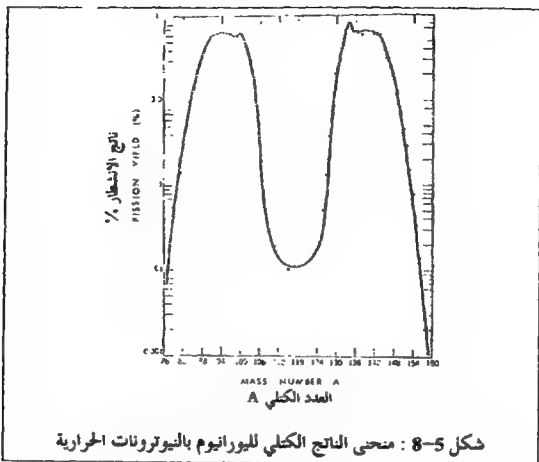
وعلى الرغم من كون الانشطار عملية معقدة جداً تتحدى العلماء النظريين باستمرار فقد ظهرت بعض النماذج المرضية والمقنعة لمعظم ظواهر الانشطار .

### 1-5-8 توزيع الكتلة والشحنة

#### Mass and Charge Distribution

هناك نوعان من الانشطار : الانشطار المتماثل (Symmetric) وغير المتماثل (Asymmetric) . ففي الانشطار المتماثل تنقسم النواة المنشطرة إلى شظيتين متساويتين في الكتلة والشحنة ، ومن الأمثلة على ذلك انشطار  $^{235}\text{U}$  بالنيوترونات الحرارية ليعطي نواتي  $^{118}\text{Pd}$  حسب المعادلة التالية :





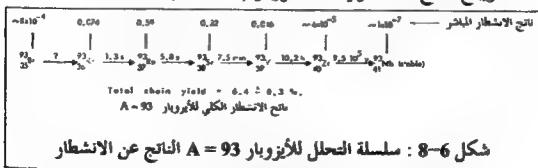
شكل 5-8 : منحنى الناتج الكتلي لليورانيوم بالنيوترونات الحرارية

وإذا نظرنا إلى الشكل (5-8) والذي يبين الناتج الكتلي لانشطار  $^{235}\text{U}$  بالنيوترونات الحرارية تبين لنا أن هناك حدين أعليين وحد أدنى . الحد الأعلى الأول بالقرب من العدد الكتلي  $A_1 = 97$  (بالقرب من الرقم السحري  $N = 50$ ) والثاني بالقرب من العدد الكتلي  $A_2 = 137$  (بالقرب من الرقم السحري  $N = 82$ ) . وتكون هاتان الكتلتان في الانقسام غير المتماثل ( $A_1 \neq A_2$ ) الأكثر احتمالية . وأما الحد الأدنى والذي يمثل الانشطار المتماثل ( $A_1 = A_2$ ) النادر حصوله في انشطار  $^{235}\text{U}$  بالنيوترونات الحرارية . فناتج الانشطار للعدد الكتلي  $A = 115$  هو  $0.01\%$  بالمقارنة مع  $6\%$  للعدد الكتلي  $A_1 = 97$  و  $A_2 = 137$  . وما أن هناك ناتج انشطار من كل انشطار ، فإن مجموع الناتج الكتلي المتوي لكل نواتج الانشطار يجب أن يساوي  $200\%$  . ويوضح

الشكل (5-8) أن لناقي الانشطار المكملين لبعضهم البعض  $A_1, A_2$  نفس قيم الناتج الكتلي وموقعين متماثلين حول الحد الأدنى . وإن مجموع  $A_2 + A_1 = 234$  وليس 236 بسبب النيوترونات القوية المنطلقة ( $v \approx 2.5$  نيوترون) ويزداد عدد النيوترونات المنطلقة كلما ازداد العدد الذري  $Z$  للنواة المنشطرة وطاقة القذف للدقيقة المتسببة في الانشطار ، ويعزى انطلاق النيوترونات القوية إلى اختلاف النسبة  $\frac{n}{p}$  في  $^{236}\text{U}$  والتي تساوي 1.6 مع نفس النسبة الضرورية للاستقرار في العناصر الناتجة عن الانشطار والتي تساوي 1.2-1.4 . إلا أن عدد النيوترونات المنطلقة غير كاف لتقليل نسبة  $\frac{n}{p}$  إلى القيم المستقرة . ولهذا تمر نواتج الانشطار بعدة خطوات تحلل إشعاعي تنطلق فيها دقائق بيتا وتحافظ على العدد الكتلي  $A$  كما درسنا سابقاً في الفصل الثالث . ومن الأمثلة على ذلك العدد الكتلي  $A = 137$  ، فأول نواة تم قياسها ضمن الأيزوبار  $A = 137$  هي  $^{137}\text{Te}$  التي تتحلل كما يلي :



ويبلغ الناتج الانشطاري لهذا الأيزوبار ( $A = 137$ ) 6.26 % .

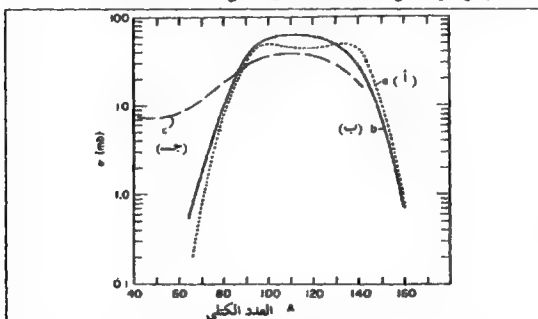


كما استطاع العلماء قياس الناتج الانشطاري لكل نظير حسب عدده الذري ضمن الأيزوبار ويوضح الشكل (6-8) هذا لـ  $A = 93$  . ويلاحظ من الشكل (6-8) أن هناك توزيعاً بطريقة جاوس للشحنات وأن هناك إزاحة لعدة وحدات تحت



قيمة  $Z$  للنواة المستقرة لقيمة الحد الأعلى لنحى جاوس . ويبلغ الناتج أعلى قيمة له في  $^{93}_{37}\text{Rb}$  (0.59) بينما العدد الذري للنواة المستقرة يساوي 41 في  $^{93}_{41}\text{Nb}$  .

وبعد ذلك تمكن العلماء من شطر العناصر الأثقل من اليورانيوم وذلك بقذفها بدقائق عالية الطاقة كالبروتونات التي تمت مسارعها إلى طاقة عالية . ولقد أثار منحى التوزيع الكتلي لهذا النوع من الانشطار اهتمام العلماء والمختصين . فإذا كانت طاقة المقذوفة قليلة نتج عن ذلك انشطار غير متماثل شبيه بانشطار  $^{235}\text{U}$  بالنيوترونات الحرارية ، وأما إذا ازدادت طاقة المقذوفة قلت ضحالة الوادي الموجود بين القيمتين شيئاً فشيئاً إلى أن نصل إلى منحى متماثل ذو سنامة واحدة (الشكل 7-8) . أي أن هناك تغييراً في أسلوب أو شكل الانشطار من غير متماثل عند الطاقة قليلة إلى متماثل عند الطاقة العالية .



شكل 7-8 : منحنيات الناتج الكتلي لنواتج الانشطار الناجمة عن تشعيع اليورانيوم بالبروتونات المختلفة الطاقة .

( أ ) 100 MeV ( ب ) 170 MeV ( ج ) 2.9 GeV

## 5-2-8 طاقة التآفر الكولومبي (الإلكتروستاتيكي) في الانشطار

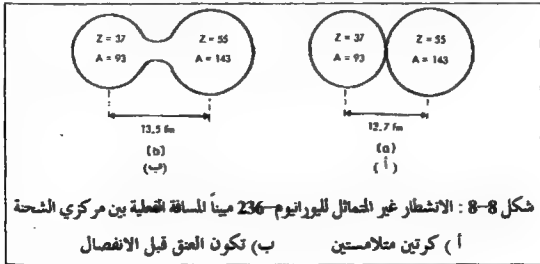
### Coulombic Repulsion Energy in Fission

نحدثنا سابقاً في الفصل الثاني وفي (2-8) عن انطلاق حوالي 200 MeV من الطاقة نتيجة لانشطار العناصر الثقيلة كاليورانيوم-235. وتقدر الطاقة الحركية لشظايا الانشطار بـ 165 MeV. وتفسر هذه القيمة من خلال احساب طاقة التآفر الكولومبي بين زوج النوات الناتج عن الانشطار. وسوف ندرس الزوج التالي:  $^{143}_{55}\text{Cs}$  و  $^{93}_{37}\text{Rb}$  والمسافة بين مركزيهما  $d = 12.7 \text{ fm}$  (الشكل 8-8)، وتستخدم المعادلة التالية:

$$E_{\text{coul}} = -\frac{Z_1 Z_2 e^2 k}{d} \quad (8-9) \quad (\text{طاقة وضع})$$

$$(k \text{ ثابت قيمته } 8.99 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})$$

في حساب طاقة التآفر عند  $d = 12.7 \text{ fm}$  والتي تساوي 175 MeV، وإذا تم تطوير النموذج ليشمل وجود عتق بين النواتين (الشكل 8-8 ب) فستزداد المسافة بين المركبين لتصل إلى  $d = 13.5 \text{ fm}$  وبالصيغ بهذه القيمة في المعادلة (8-9) حصلنا على طاقة تآفر (الطاقة الحركية للانفصال) تساوي 165 MeV وتتفق مع التجارب. وهناك عدة إثباتات على وجود الاستطالة في الشكل وتكون عتق في وقت الانفصال بين النواتين (الشكل 8-8 ب).



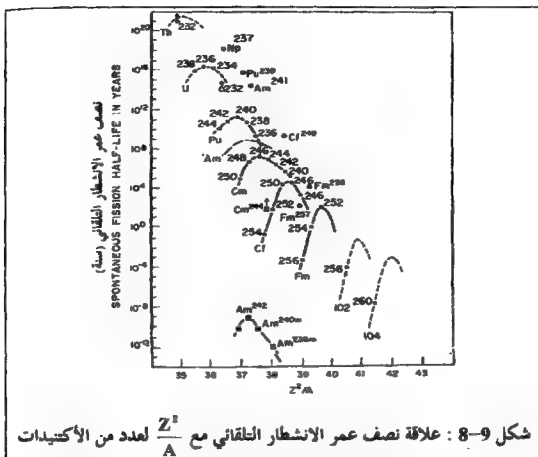
### 3-5-8 نماذج الانشطار Fissions Models

درسنا في الفصل الثاني عن العلاقة بين النواة وقطرة السائل ولقد استخدم العالمان ن. بوهر و ج. ويلر هذه الحقيقة في تفسير الانشطار. وتتخذ قطرات السائل الشكل الكروي بسبب وجود ظاهرة التوتر السطحي في ذلك السائل . ويمكن أن نشوه هذا الشكل بطريقة ما من خلال تزويده بالطاقة . وفي حال كانت قوة التوتر السطحي الجذابة أكبر من قوة التشويه ، تأرجحت القطرة بين الشكل الكروي والشكل المطال . وأما إذا حدث العكس فستمدى استطالة القطرة النقطة الحدية لتنفلق (تنشطر) .

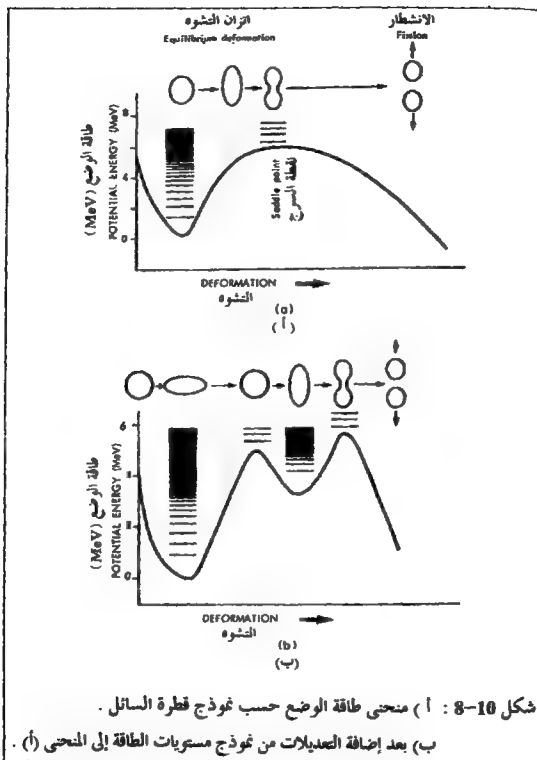
ذكرنا في الفصل الثاني كيف تتناسب قوة التناثر بين البروتونات في النواة مع  $\frac{Z^2}{A^{1/3}}$  وكيف تتناسب قوى التوتر السطحي مع  $A^{2/3}$  . كما تسمى قوة التناثر الكولومبي إلى تشويه النواة بنفس الطريقة التي قد تؤثر فيها قوة تشويه على قطرة سائل ما ، بينما تسمى قوة التوتر السطحي لتبقيها كروية . وتقاس النسبة بين هاتين القوتين المتماكستين مدى عدم استقرار النواة نحو الانشطار :

$$(8-10) \quad \frac{Z^2}{A} = \frac{Z^2/A^{1/3}}{A^{2/3}} = \frac{\text{طاقة التناثر}}{\text{طاقة التجاذب}} \propto \text{عدم الاستقرار}$$

ويسمى المقدار  $\frac{Z^2}{A}$  بمحد الانشطار ، وتتنبأ نظرية قطرة السائل بازدياد احتمالية الانشطار كلما ازداد  $\frac{Z^2}{A}$  . ويتميز  $^{235}\text{U}$  عن بقية الأنوية الموجودة في الطبيعة بقابليته على الانشطار بالنيوترونات الحرارية ، بينما يحتاج  $^{238}\text{U}$  نيوترونات ذات طاقة عالية ( $\leq 2\text{MeV}$ ) . وكلما ازداد العدد الذري ( $Z < 92$ ) ازدادت احتمالية الانشطار بالنيوترونات الحرارية ونقص نصف عمر التحلل بالانشطار التلقائي . وتزداد احتمالية كل منهما في العناصر ذات العدد الذري الزوجي أكثر من العدد الفردي . ويسين الشكل (9-8) العلاقة بين نصف عمر التحلل بالانشطار التلقائي وحد الانشطار .



الفرض نموذج قطرة السائل أن النواة كروية (الفصل الثاني) ، وإذا ثبتا  $N$  و  $Z$  وحسبنا طاقة الوضع لقطرة السائل النووية بدلالة التشوه في النواة من الشكل الكروي إلى الشكل الممتد (Prolate) ، حصلنا على المنحنى الموضح في الشكل (10-8 أ) . توجد النواة في مستوى الطاقة الأرضي لبئر الوضع (Potential Well) . ولشطر النواة لايد أن تثار أو تهيج فوق حاجز الانشطار ، علماً بأنه يرتفع بمقدار 5-6 MeV . وهذا يعني أن تثار النواة إلى منطقة المستوى المستمر وعلى أن تحتفظ بشكلها الأصلي . وفي حال حدث تشوه للنواة فإن بعض طاقة التهيج يتحول إلى طاقة تشوه . ويلاحظ من الشكل (10-8 أ) وصول النواة إلى أقصى كمية تشوه عند قمة الحاجز وبحيث تحتفظ بطاقة تهيج داخلية قليلة نسبياً . أي أن النواة موجودة في مستويات اهتزازية معروفة يحدث منها الانشطار ، وتسمى قمة الحاجز بنقطة السرج (Saddle Point) للانشطار .



وجد العلماء أن معادلة الكتلة شبه التجريبية (الفصل الثاني) عاجزة عن حساب

الكتل بدقة للنظائر الموجودة بالقرب من الأرقام السحرية للبروتونات والنيوترونات . ولقد تبين مؤخراً عجز هذه المعادلة عن حساب الكتل بدقة للنظائر المشوهة والتي تقع في المنتصف بين الأرقام السحرية أو بين مستويات الطاقة الممتلئة للنيوكليونات . وأضاف ظهور بعض الأيزومرز التي تتحلل بالانشطار الطقائي مشاكل أخرى لنموذج قطرة السائل . فبين اليورانيوم والكاليفورنيوم العديد من النوى التي تتحلل بالانشطار الطقائي وينصف عمر يتراوح من  $10^{-12}$  -  $10^{-9}$  ثانية وهذا أبطء بملايين المرات من الانشطار الفوري الذي يحدث في  $10^{-14}$  ثانية وأسرع بملايين المرات من الانشطار الطقائي العادي (الشكل 9-8) . ومن الأمثلة على ذلك  $^{242}\text{Cm}$  الذي ينشطر تلقائياً من الحالة الأرضية بنصف عمر يساوي  $10^6$  سنة، بينما تنشطر الحالة الأيزومرية له بنصف عمر يساوي  $10^{-7}$  ثانية . ولقد طور العالم ق.م. سزوتينسكي نموذجاً يفسر بطريقة مرضية انشطار الأيزومرز . ويقدر حاجز الانشطار للنوى ذات نصف العمر القصير بحوالي 2-3 MeV . ولقد أدخل بعض التعديلات الناجمة عن تأثير مستويات الطاقة الممتلئة وغير الممتلئة في نموذج قطرة السائل وحصل على ما يسمى بمنحنى طاقة الوضع ذو البئرين (Double-Well) (الشكل 10-8 ب) . فيكون للنواة في البئر الأول الشكل شبه الكروي (Spheroid) وتكون نسبة المحور الرئيسي إلى الثانوي 1.25، ويزداد التشوه في البئر الثاني لتصبح النسبة 1.8 . وتكون النواة في البئر الثاني شبه مستقرة (حالة أيزومرية) وذلك لأنها غير مستقرة نحو التحلل بجما إلى البئر الأول أو نحو الانشطار . ويعيق الانشطار من البئر الثاني حاجز ارتفاعه 2-3 MeV ومن البئر الأول حاجز ارتفاعه 5-6 MeV وهذا يفسر الفرق الكبير في نصف العمر كما ورد في مثال  $^{242}\text{Cm}$  السابق . ويتبأ منحني البئر الواحد (شكل 10-8 أ) بمحذوث انشطار متماثل بينما يتبأ منحني البئرين بالانشطار غير المتماثل (شكل 10-8 ب).

## 8-6 تهدئة النيوترونات Neutron Moderation

يُحجر الأسلوب المتبع في تهدئة النيوترونات من سمات التصميم المهمة للمفاعلات الحرارية . وتقتد النيوترونات الانشطار السريعة طاقتها الحركية من خلال التشتت المرن مع ذرات مادة البناء . ولقد ذكرنا في الفصل الخامس معادلات الصغير في طاقة النيوترون في هذه التصادمات المباشرة ، وبما أن هناك تشتت زاوي في معظم التصادمات فإن عدد التصادمات اللازمة لتقلل طاقة النيوترون السريع إلى نيوترون حراري أكبر . ويساوي معدل نقصان الطاقة اللوغارتمي ما يلي :

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{E_n}{E'_n} \right) \quad (8-11)$$

حيث أن  $E'_n$  طاقة النيوترون بعد الاصطدام . وبين الجدول (8-2) فعالية الماء  $H_2O$  العالية في تخفيض سرعة النيوترون بالمقارنة مع بعض المواد الأخرى كالماء الثقيل ( $D_2O$ ) والبريليوم ( $Be$ ) والجرافيت ( $C$ ) . وإن معدل عدد الاصطدامات  $n$  اللازم لتقليل الطاقة للنيوترون من  $E_n^0$  إلى  $E_n$  هو :

$$n = \frac{1}{\varepsilon} \ln \left( \frac{E_n^0}{E_n} \right) \quad (8-12)$$

وتعتمد قدرة المادة على الإبطاء ( $SDP$ ) **Slowing Down Power** على عدد التصادمات وعلى المقطع العرضي للتشتت ( $\sigma_s$ ) وعلى عدد ذرات المادة المشتتة في وحدة الحجم ( $N_0$ ) .

$$SDP = \varepsilon N_0 \sigma_s = \varepsilon \sum s \quad (8-13)$$

وتحمل قيمة  $SDP$  المعدل الذي يغطي منطقة النيوترونات فوق حرارية . وتمتاز المادة المهدئة الجيدة بقدرتها على تحويل أقل عدد من النيوترونات بعيداً عن تفاعل الانشطار ، أي أن المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات صغير . ولهذا فإن

للماء الثقيل  $D_2O$  وللجرافيت (الكربون) أفضلية على الماء الخفيف  $H_2O$  ، وذلك لأن احتمالية حدوث التفاعل  $^1H(n,\gamma)^2H$  كبيرة نسبياً . ولإدخال هذه الخاصية ، يستخدم مفهوم نسبة التهدئة (Moderating Ratio (MR كمقياس لقدرة الماء المهدئة في منطقة طاقة النيوترونات الحرارية .

$$MR = \frac{SDP}{\sum_a} = \epsilon \frac{\sum_s s}{\sum_a a} \quad (8-14)$$

Property الخاصية	$H_2O$	$D_2O$	Be	C
$N_0 \times 10^{-30}$ (atoms $m^{-3}$ )	0.033 4	0.033 4	0.123	0.080 3
$\rho$ (t $m^{-3}$ )	1.0	1.10	1.84	1.62
$\sigma_a$ (th) (barns)	0.66	0.000 92	0.009	0.004 5
$\sum_s$ (th) ( $m^{-1}$ )	1.7	0.008 0	0.13	0.036
$\sigma_s$ (epith) (barns)	49	10.6	5.9	4.7
$\xi$	0.927	0.510	0.209	0.158
$\xi \times (\text{epith}) \sum_s$ (th) $\sum_s^{-1}$	62	5860	138	166
$L_a^2$ ( $m^2$ )	$7.62 \times 10^{-4}$	2.89	$4.8 \times 10^{-2}$	0.287
$\tau$ ( $m^2$ )	0.002 8	0.011 5	0.010 0	0.038 0

جدول 8-2 : الخواص الفيزيائية لبعض المواد المهدئة .

ويُلخص الجدول (8-2) خواص المواد المهدئة المعروفة ، وتتناقص سمات المواد المهدئة في الاتجاه التالي  $C < D_2O < Be < H_2O$  . وتستخدم المقادير التجارية الماء الخفيف  $H_2O$  بدلاً من الماء الثقيل  $D_2O$  لرخص ثمنه وتوافره بكميات كبيرة في الأنهار والبحيرات .

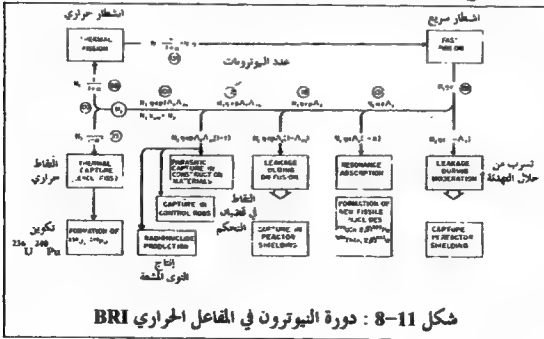


## 8-7 دورة النيوترون The Neutron Cycle

من أجل استمرار التفاعل المتسلسل لا بد من أن يتسبب أحد النيوترونات الناتجة عن الانشطار في انشطار جديد . وتعرف هذه الحالة بمعامل التكاثر للنيوترونات  $K$  والذي يساوي :

$$K = \frac{\text{عدد النيوترونات في الجيل 2}}{\text{عدد النيوترونات في الجيل 1}} \quad (8-15)$$

فإذا كانت قيمة  $K < 1$  فإن عدد النيوترونات في الجيل الثاني أعلى من عدد النيوترونات المستهلكة . وفي هذه الحالة يزداد فيض النيوترونات وعدد الانشطارات في كل جيل جديد مما سيؤدي إلى زيادة في إنتاج الطاقة في المفاعل . وفي حال كانت قيمة  $K = 1$  فإن عدد الانشطارات في وحدة الزمن والطاقة الناتجة ثابتين . وأما إذا كانت  $K < 1$  فلن يستمر التفاعل المتسلسل . ويسمى المفاعل الذي يعمل ضمن  $K = 1$  بالخرج ، وضمن  $K < 1$  بفوق الحرج وضمن  $K > 1$  بدون الحرج . وتستخدم قضبان التحكم في التحكم بقيمة  $K$  .



تعرض النيوترونات في كل جيل للعديد من المصائر الشكل (11-8) .  
 بعضها يهرب من المفاعل أو يمتص من قبل المواد المكونة للمفاعل والدرع الواقعي  
 (مثل قضبان التحكم ، والمواد المهدنة والمردة ... إلخ) . ويستخدم في واقع الأمر  
 معاملان مختلفان لتكاثر النيوترونات هما  $K_{\infty}$  للمفاعل ذو الأبعاد اللانهائية (لا  
 يوجد تسرب) و  $K_{eff}$  للمفاعل ذو الحجم المحدد العملي ، ويرتبطان مع بعضهم  
 البعض من خلال المعادلة التالية :

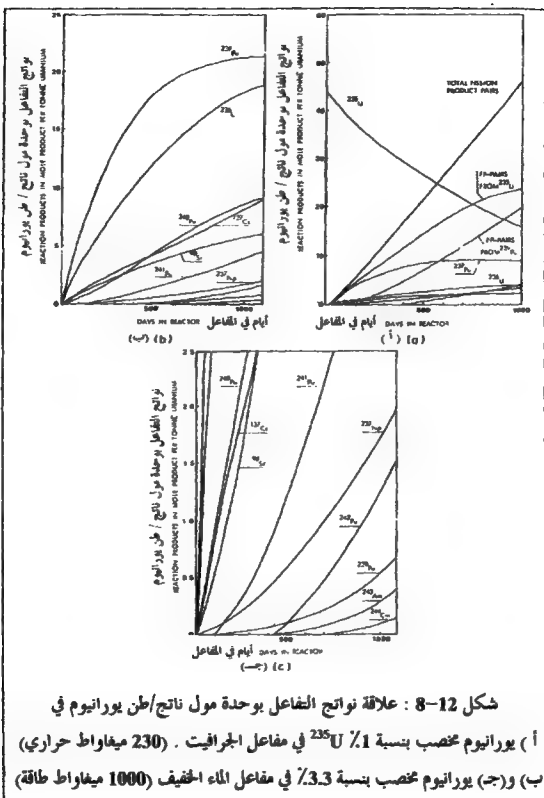
$$K_{eff} = K_{\infty} \Lambda \quad (8-16)$$

و يمثل  $\Lambda$  ذلك الجزء من النيوترونات الذي لا يفقد نتيجة تسربه إلى المناطق  
 المحيطة (معامل عدم التسرب) . ومن أجل أن نقلل من تسرب النيوترونات ، يُحاط لب  
 المفاعل بعاكس للنيوترونات **Neutron Reflector** ، مكون من الجرافيت أو الماء أو  
 البريليوم في حال النيوترونات الحرارية أو الحديد في حال النيوترونات السريعة.

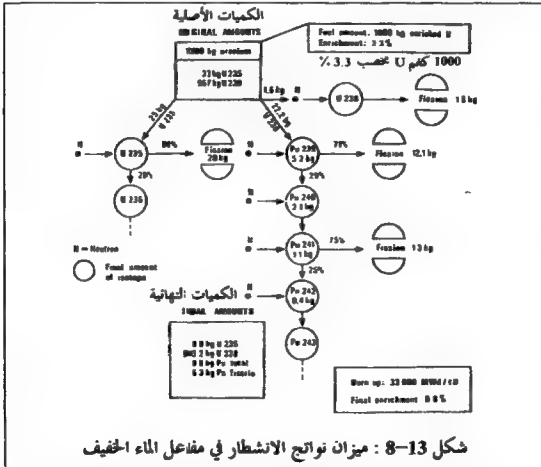
## 8-8 الإفادة من الوقود Fuel Utilization

يوضح الشكل (12-8) استهلاك  $^{235}\text{U}$  المنشطر وتكون  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{241}\text{Pu}$   
 القابلة للانشطار وبعض الأكسينيدات وبعض نواتج الانشطار من خلال التقاط  
 النيوترونات المصحوب بالإشعاعات من قبل ذرات  $^{238}\text{U}$  و  $^{240}\text{Pu}$  الخصبه . ولكل  
 نوع من المفاعلات شكل خاص فيه ومنحنيات خاصة به . ويبين الشكل (4-8)  
 تفاعلات الالتقاط والتحلل المختلفة . ومن (2-8) يستهلك المفاعل الذي يعمل  
 بطاقة 3 غيغاواط حراري 3.16 كغم  $^{235}\text{U}$  في اليوم ، ونظراً للتفاعل التالي  
 $^{235}\text{U}(n,\gamma)^{236}\text{U}$  فسوف تستهلك كمية إضافية من اليورانيوم-235 ، ولتبرير كل

$$\text{هذا تستخدم العلاقة التالية : } \frac{\sigma_f + \sigma_{\gamma}}{\sigma_f} = 1.17$$



أي أن استهلاك  $^{235}\text{U}$  الفعلي =  $3.16 \times 1.17 = 3.70$  كغم/اليوم . وهذا ينطبق على لب المفاعل الجديد فقط ، لأن المفاعل الذي يعمل لفترة من الزمن سينتج  $^{239}\text{Pu}$  والذي سينشطر ويطلق طاقة تضاف إلى الطاقة المنطلقة من  $^{235}\text{U}$  . وبعد ذلك يساهم  $^{241}\text{Pu}$  أيضاً . وبعبارة أخرى يقل استهلاك  $^{235}\text{U}$  تدريجياً مع مرور الزمن لنفس الكمية من الطاقة المنتجة . ففي فترة عمر اللب المخصب باليورانيوم بنسبة 2-3٪ يتسبب انشطار نظائر البلوتونيوم في 40٪ من الطاقة الكلية الناتجة (الشكل 13-8) .



وتستهلك محطة الطاقة التي تعمل بالماء الخفيف LWR 2.2 كغم  $^{235}\text{U}$  و 2.0 كغم  $^{238}\text{U}$  في اليوم وتنتج 1000 ميغاواط طاقة بفاعلية 33٪ . وفي المقابل ينتج

3.1 كم من نواتج الانشطار في اليوم من انشطار اليورانيوم والبلوتونيوم . ولهذا تستخدم المقاطع المعرضة الفعالة في حساب الناتج (الشكل 4-8) . وكلما ازداد  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{241}\text{Pu}$  الناتج مقابل كل ذرة  $^{235}\text{U}$  تستهلك ازدادت فعالية الإفادة من الوقود . ونعبر عن هذا بمعامل التحويل C .

$$C = \eta - 1 - S \quad (8-17)$$

وتمثل S النيوترونات المفقودة أو الضائعة بطرق أخرى غير الانشطار وتفاعلات الالتقاط التي تؤدي لإنتاج ذرات قابلة للانشطار . فإذا افترضنا أن  $C=0.8$  لمفاعل ماء ثقيل فإن مقابل كل 100 ذرة منشطرة من  $^{235}\text{U}$  سينتج 80 ذرة جديدة من  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{241}\text{Pu}$  .

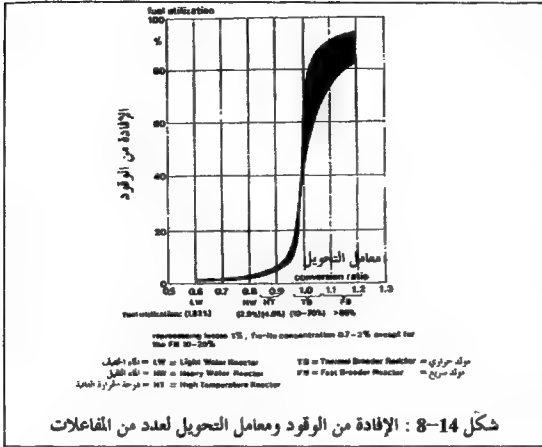
وفي الجيل الثاني ينتج  $C^2$  جديدة من ذرات  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{241}\text{Pu}$  . أي أن الجزء الذي يتحول من الوقود إلى ذرات قابلة للانشطار هو :

$$x_i (1 + C + C^2 + \dots) = \frac{x_i}{1 - C} \quad (8-18)$$

وتمثل  $x_i$  ذلك الجزء من الذرات القابلة للانشطار في العينة الأصلية ، وتساوي لليورانيوم الطبيعي 0.0071 ، وتمثل النسبة  $\frac{x_i}{1 - C}$  الإفادة القصوى للوقود . وإذا استطاع مفاعل ما أن يستهلك كل المواد القابلة للانشطار الأصلية والمصنعة فيه ، حصلنا على خمس أضعاف الطاقة المنتجة من تركيز  $^{235}\text{U}$  الأصلي فقط عند  $C = 0.8$  . وبستحال حدوث هذا نظراً لكبر المقطع المستعرض لالتقاط النيوترون من قبل نواتج الانشطار .

وتسمى المفاعلات التي لها  $C \approx 1$  بالمفاعلات المحولة Converter Reactors ، والمفاعلات التي لها  $C > 1$  بالمفاعلات الحارقة Burners . وتصنف مفاعلات الماء الخفيف ضمن الحارقة لأن لها  $C \geq 0.6$  . ويوضح الشكل (8-14) الإفادة من

## الوقود في المفاعلات المختلفة .



ويشار إلى الإفادة من الوقود بالاستحراق Burn-up ونعبر عنه بنسبة الوقود المستعمل قبل أن يستبدل . فعلى سبيل المثال إذا كان الحرق 1% فهذا يعني أن من كل 1.0 طن من الوقود ، يستهلك 10 كغم من الذرات المنشطرة والذرات التي تتكون ولديها قابليتها للانشطار من خلال الانشطار والالتقاط . ولقد جرت العادة أن نعبر عن الاستحراق بكمية الطاقة الناتجة من كل طن من الوقود . فإنتاج 33000 ميغاواط/اليوم من الطاقة الحرارية يستهلك 25 كغم  $^{235}\text{U}$  و 23.8 كغم  $^{238}\text{U}$  من كل 1000 كغم يورانيوم مخضب ، أي ما نسبته 4.88% ، في مفاعل الماء الخفيف LWR . وأما ما نسبته 1% استحراق فيساوي 
$$6762 = \frac{33000}{4.88}$$

مغاطات حراري يوميا/طن من اليورانيوم . وإذا أخذنا بعين الاعتبار 6.3 كغم من البلوتونيوم المتكون والذي يحل محل  $^{235}\text{U}$  فيقل الاستهلاك الكلي إلى 48.8-6.3 = 42.5 كغم أو 4.25% ، أي أن 1% استحقاق مساوي 7765 مغاطات حراري/يوم طن يورانيوم . ويعطي كل 7 طن يورانيوم طبيعي واحد طن من اليورانيوم المخصب بنسبة 3.3%  $^{235}\text{U}$  ، أي أن الإفادة من اليورانيوم الطبيعي قليلة، على أن إعادة تصنيع البلوتونيوم الناتج ستزيد من الإفادة إلى الأرقام الموجودة في الشكل (14-8) .

وفي حال كانت قيمة  $C < 1$  نتج عن المفاعل مواد قابلة للانشطار أكثر من المستهلكة في الانشطار ، وسمي هذا النوع من المفاعلات بالمولد وسميت العملية بالتوليد . ويعبر عن كسب التوليد (Breeding Gain)  $G$  بالمعادلة التالية :

$$G = \eta - 2 - S \quad (8-19)$$

ويعرف كسب التوليد بقدرة المفاعل على التوليد ، ويلاحظ من الجدول (8-1) أن قيمة  $\eta < 2$  لكل من  $^{233}\text{U}$  و  $^{235}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{241}\text{Pu}$  ، وقد تزداد قيمة  $\eta$  إذا استخدمت المقاطع المستعرضة الفعالة (الشكل 4-8) فإذا وجدت هذه الأنوية مع المواد التي يمكن أن ينتج عنها مواد انشطارية مثل  $^{238}\text{U}$  و  $^{232}\text{Th}$  نتجت مواد انشطارية أكثر من تلك المستهلكة على شرط أن تكون خسارة النيوترونات أقل ما يمكن . وتزداد الإفادة في المولدات إلى 10% كحد أقصى في وجود المحولات، ويسمح التوليد باستخدام حوالي 70% من مادة الوقود (اليورانيوم الطبيعي أو الثوريوم الطبيعي) مع الاستفادة من إعادة التصنيع (الشكل 14-8) .

ويبين الجدول (8-1) أن أعلى قيمة  $\eta$  هي لـ  $^{233}\text{U}$  مع النيوترونات الحرارية ولـ  $^{239}\text{Pu}$  مع النيوترونات السريعة . وهذا يوحي بوجود نوعين من المولدات ،

المولدات الحرارية المبنية على التفاعل  $^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{232}\text{Th}$  والمولدات السريعة المبنية على التفاعل  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ .

ومن أجل أن تعمل هذه المولدات بفاعلية عالية لأبد من تزويدها بتركيز عال من  $^{233}\text{U}$  أو  $^{239}\text{Pu}$  يتراوح من 15% إلى 30%.

وتصل الإفادة من الوقود في المولد السريع مثل فينكس الفرنسي إلى أعلى ما هو مذكور في مفاعلات الماء الخفيف ، فواحد في المئة استحقاق يكافئ 8500 ميجاواط حراري/يوم طن من الذرات الثقيلة . وقد يصل الاستحقاق إلى 15% (130000 ميجاواط/يوم طن) .

## 8-9 ظاهرة أوكلو The Oklo Phenomenon

استخرج الفرنسيون اليورانيوم من منجم أوكلو في الغابون في أفريقيا للعديد من السنين ، وكانوا ينقلون اليورانيوم إلى محطة بيرات لتخصيب اليورانيوم الفرنسية لاستخدامه في المفاعلات . وقدر الخام بحوالي 400000 طن من اليورانيوم ولقد وجدت بعض الجيوب الغنية جداً باليورانيوم مطمورة في الحجر الرملي والغرانيت . وتأخذ هذه الجيوب شكل العدسة ويبلغ طولها 10م وقطرها حوالي 1م وتحتوي على 10-20% بتش بلند ، وهناك بعض البقع التي تحتوي على 85% من البتش بلند النقي .

وفي عام 1972 اكتشف العلماء أن نسبة نظائر اليورانيوم لبعضها البعض تختلف عن النسبة المعروفة لليورانيوم والمستخرجة من مصادر أخرى ، فلقد بلغت نسبة  $^{235}\text{U}$  في خام الغابون أقل من  $> 0.5\%$  علماً بأن النسبة في اليورانيوم الطبيعي  $0.72\%$  ، وتؤدي النسبة القليلة  $> 0.5\%$  إلى صعوبات في عملية التخصيب . ولقد



أظهرت الدراسات أن نسبة  $^{142}\text{Nd}$  في النيوديميوم الطبيعي 27٪ بينما في أوكلو أقل من 5٪ ، ونسبة  $^{143}\text{Nd}$  12٪ بينما في أوكلو 24٪ . وإذا درسنا نواتج الانشطار وجدنا أن نسبة  $^{143}\text{Nd}$  29٪ ونسبة  $^{142}\text{Nd}$  صفر بالمقارنة مع النسب في أوكلو لـ  $^{142}\text{Nd}$  ،  $^{143}\text{Nd}$  ،  $^{235}\text{U}$  . وفسر العلماء هذا على أساس انشطار  $^{235}\text{U}$  في الزمن الماضي ، مما أدى إلى انخفاض نسبة  $^{235}\text{U}$  وزيادة نسبة  $^{143}\text{Nd}$  ، ولقد دعمت هذا التفسير الدراسات التي أجريت على التكوين النظيري لعناصر الانشطار الأخرى .

ونظراً لقصر نصف عمر  $^{235}\text{U}$  بالمقارنة مع  $^{238}\text{U}$  فإن كل خامات اليورانيوم كانت غنية باليورانيوم 235 في الزمن الماضي . ولقد قدر العلماء عمر الرواسب في أوكلو بـ  $1.74 \times 10^9$  سنة من خلال تحليل  $^{87}\text{Sr} - ^{87}\text{Rb}$  وأن نسبة  $^{235}\text{U}$  في ذلك الوقت في اليورانيوم الطبيعي بـ 3٪ .

ويزداد عامل الانشطار  $\eta$  كلما ازدادت نسبة  $^{235}\text{U}$  ، ويساوي 1.8 عند 3٪  $^{235}\text{U}$  ، ولقد أدت الظروف في رواسب أوكلو الطبيعية إلى قيمة  $K_{\infty} < 1$  . وبما أن طبيعة الرواسب رسوبية ، وأنها قد تكونت في وجود الماء وكانت نسبة  $\text{H}_2\text{O} : \text{U}$  هي 1:3 فإن  $K_{\infty} < 1$  .

ولقد أثبتت التحاليل والحسابات وجود مفاعلات أوكلو الطبيعية لمدة تقل عن  $10^6$  سنة . وكان للماء دور مهم فكلما غلي الماء وتبخّر توقف عمل المفاعل إلى أن يأتي المطر بالماء فيعود المفاعل إلى العمل . وقدر فيض النيوترونات بما لا يقل عن  $10^9$  ن/سم<sup>2</sup> ثانية . كما قدرت كمية  $^{235}\text{U}$  المستهلكة بحوالي 6 طن ، والطاقة الناتجة الكلية بحوالي 2-3 غيغا واط/السنة وكمية  $^{239}\text{Pu}$  المتكونة من التقاط  $^{238}\text{U}$  نيوترون بحوالي 1.0-1.5 طن ، ونظراً لقصر عمر  $^{239}\text{Pu}$  النسي فلقد تحلل مع مرور السنين إلى  $^{235}\text{U}$  . ويستدل على هذا من وجود بعض العينات المخضبة

## باليورانيوم-235 .

ولقد بينت الدراسات وجود الفضلات المشعة في مفاعل أوكلو ، فهناك البلوتونيوم والعناصر النادرة ، أما العناصر المتطايرة والذائبة في الماء مثل السيزيوم والسترونشيوم فلم توجد في موقع المفاعل ، ووجدت نواتج الانشطار الأخرى ، على الرغم من مرور  $1.7 \times 10^9$  سنة . وهناك عدة أمثلة في العالم على ما حدث في أوكلو .

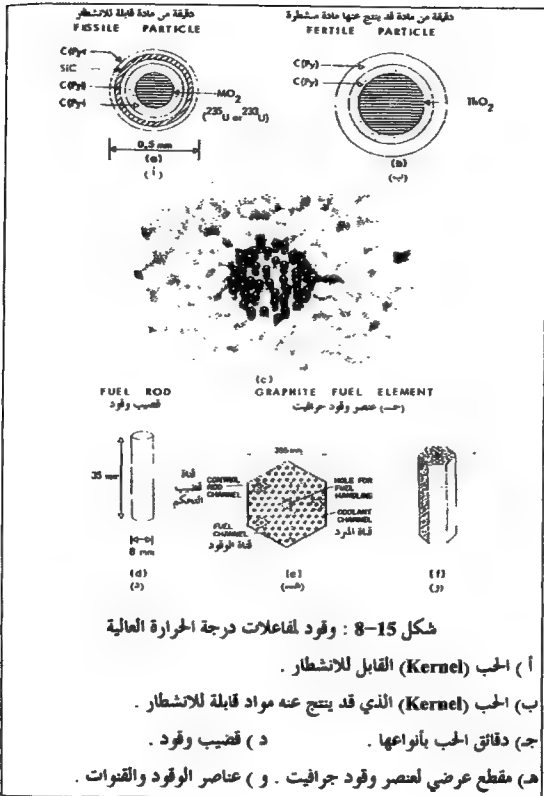
## 8-10 الوقود النووي Nuclear Fuels

تستخدم المفاعلات النووية التجارية اليورانيوم كوقود . ويكون اليورانيوم إما بحالته الطبيعية (نسبة  $^{235}\text{U}$  0.7٪) أو مخصب باليورانيوم-235 لارتفاع نسبة  $^{235}\text{U}$  . وقد تحتوي بعض المفاعلات أيضاً على  $^{232}\text{Tl}$  الذي يولد  $^{233}\text{U}$  المنشطر أو  $^{239}\text{Pu}$  الناتج عن  $^{238}\text{U}$  بالإضافة إلى  $^{235}\text{U}$  (وقود متنوع) .

وبغض النظر عن عنصر الوقود أكان يورانيوم أو ثوريوم أو بلوتونيوم فلا بد أن تكون لديه القدرة على مقاومة درجات الحرارة المرتفعة والتي قد تزيد على 1000°م دون أن يفسد كيميائياً أو فيزيائياً بسبب الحرارة أو الإشعاع .

تتمتع عناصر الوقود المعدنية بالتوصيل الحراري العالي مما يساعدها على تقليل آثار الحرارة ولكن لسوء الحظ ينصهر اليورانيوم عند 1130°م والبلوتونيوم عند 640°م . وقد تسبب الحرارة أو الإشعاع مجتمعين أو منفصلين إلى إعادة التبلور لتعطي أشكالاً بلورية مختلفة ذات أبعاد فيزيائية مختلفة في قضبان الوقود . وتقلل هذه التشوهات من الاستقرار الميكانيكي وتزيد من التآكل لعنصر الوقود حتى لو كانت مكسوة بالمعدن .

تستخدم معظم مفاعلات الطاقة حبيبات من  $\text{UO}_2$  أو  $\text{PuO}_2$  أو  $\text{ThO}_2$  المغلفة بالسيراميك ، ويصل حجم الحبيبات الاسطوانية إلى  $1 \times 1$  سم (القطر X الارتفاع) الشكل (15-8 أ) . وتمتاز عناصر الوقود السيراميكية بمقاومتها لدرجات الحرارة العالية وللإشعاعات ولا يحدث فيها تحولات في الحالة (أو الطور) كما في المعادن . ولسوء الحظ فإن توصيلها الحراري غير مرض بالمقارنة مع عناصر الوقود المعدنية ولهذا قد يصل الميل الحراري فيها إلى  $100^\circ\text{C}/\text{m}$  مما قد يؤدي إلى انصهار عناصر الوقود السيراميكية الموجودة في المركز (درجة انصهار  $\text{UO}_2$   $2700^\circ\text{C}$ ) بينما تبقى درجة الحرارة عند السطح أقل بكثير من درجة الانصهار . وللحصول على أقصى توصيل حراري في مواد الوقود السيراميكية لابد من ضغطها بشدة وتليدها لتصل إلى كثافة 11 غم/سم<sup>3</sup>  $\text{UO}_2$  . وإذا استخدم مخلوط من الأكاسيد كعناصر للوقود (MOX) كاستخدام  $\text{UO}_2$  مع  $5\% \text{PuO}_2$  في مفاعلات الماء الخفيف أو  $\text{UO}_2$  مع  $15\% \text{PuO}_2$  في المولدات السريعة ، يجب أن يكون مخلوط  $\text{UO}_2$ - $\text{PuO}_2$  متآلف لحد كبير ، كأن يكون محلول صلب . ويتم الحصول عليه من خلال عملية الترسيب الإسهامي للأكتينيدات رباعية التأكسد على هيئة الأوكزالات المتبوعة بعملية الكلسنة . تضاف عناصر الوقود MOX بشكل منتظم إلى لب العديد من مفاعلات الماء الخفيف الأوروبية دون أي صعوبات تقنية . كما يستخدم مخلوط من أكسيد اليورانيوم والثوريوم كوقود في مفاعلات الماء الثقيل . ويمكن الاستعاضة عن الحبيبات بدقائق الوقود الكروية ، نظراً للعديد من المزايا كال تصنيع والإفادة من المفاعل وإعادة تصنيع الوقود . ولدقائق الأكسيد أو الكريد قطر صغير أقل من 1 ملم (الشكل 15-8 ج) .



وتصنع هذه الدقائق بطريقة الجل-الخطول (Sol-gel process) حسب الخطوات التالية :

أ ) يحضر محلول غروي من الأكسينيدات أو الأكسيد . وقد تأخذ الأكسينيدات صيغة المعقدات الميعة عند التركيزات العالية من 3-4 جـ (M) .

ب) يضاف الخطول إلى ملبب خمل ، والذي بدوره يزيل الماء من المعقد فيحول القطرات إلى مادة هلامية . ومن الأمثلة على ذلك إضافة مبدئي مظهر رباعي الأمين  $(CH_2)_4N_4$  إلى الخطول المائي ، ثم يضاف الخطول الناتج قطرة قطرة إلى الملبب العضوي الساخن (حوالي 95م) . تؤدي الحرارة إلى تحلل  $(CH_2)_4N_4$  ليغطي  $NH_3$  والتي بدورها ترسب الهيدروكسيد في القطرة . فقد القطرة الماء وتصلب بسرعة مكونة ما يسمى بالحب "Kernel" .

جـ) يغسل الحب ويخفف بالهواء عند 150-200م وفي حال البورانيوم يحتزل بالهيدروجين عند درجة حرارة عالية ليكون  $UO_2$  .

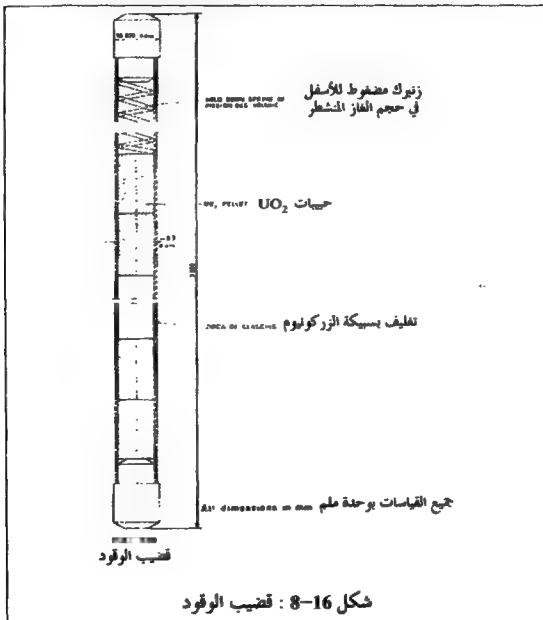
د ) يلبد الحب عند درجة حرارة عالية في جو خامل .

وتستخدم الطريقة السابقة في تحضير حب كربينات الأكسيد . ويوضع الحب في أغشية قضبان الوقود ثم يضغط ليكون حبيبات (الشكل 15-8 د) .

يغلف الوقود المعدني بصفائح من الألنيوم أو المغنسيوم أو سبيكة منهما ، أما حبيبات أكسيد الوقود فغلف بسبائك من الزركونيوم أو الفولاذ . وتهدف عملية تغليف الوقود إلى حمايته من التآكل وإلى حماية المبرد من التلوث الإشعاعي من نواتج الانشطار .

يستخدم الألنيوم في مفاعلات الماء الخفيف ولكن عند درجة حرارة أعلى من 300م لابد من استخدام سبائك الزركونيوم الأقوى . ويمتص الزركونيوم الهيدروجين إذا وصلت درجة حرارة البخار إلى أعلى من 400م ، مما يؤدي إلى الزيادة في هشاشته ، فيستعاض عنه بالفولاذ . ومن أشهر السبائك ، سبيكة الزركونيوم-2 والتي تتكون من 1.5% Sn و 0.3% Cr و Ni و Fe ، بالإضافة إلى الزركونيوم ، وسبيكة الفولاذ-302B والتي تتكون من 18% Cr و 8% Ni بالإضافة إلى الفولاذ . ولا يستخدم الفولاذ عند درجات الحرارة المنخفضة لارتفاع المقطع المستعرض لالتقاط النيوترونات ( $\sigma = 0.23 \text{ b}$  للألنيوم و  $0.18 \text{ b}$  لسبيكة الزركونيوم و 3b للفولاذ-302B) .

وللحصول على توصيل حراري جيد بين الوقود والتصفيح تستخدم مواد رابطة مثل مصهور الصوديوم ومسحوق الجرافيت ... إلخ . ويجب أن تتوفر في مادة التغليف أو التصفيح القدرة على مقاومة التآكل من المبرد عند جميع درجات الحرارة وأن لا تتفاعل مع عنصر الوقود أو مع المادة الرابطة . ويراعى في التغليف الرقة والقوة الميكانيكية الكافية والمقاومة للتآكل (الشكل 8-16) .



تتكون عناصر الوقود المستخدمة في المفاعلات المبردة بالغاز ذات درجات الحرارة العالية من قضبان من الجرافيت أو كرات مملوئة بحبيبات الكريد أو الأوكسيد المحضرة بطريقة الجل-المحلول . كما تغطي الحبيبات بعدة طبقات من الجرافيت وكريد السليكون (الشكل 15-8 أ و ب) .

يشكل الوقود أهم جزء في اقتصاد مفاعلات الطاقة ، ويساهم بحوالي 20٪ من تكلفة الطاقة الكهربائية المولدة من المفاعلات من خلال استهلاك المادة المتظرة والإنتاج وإعادة التصنيع . ويتطلع العلماء إلى التقليل من تكلفة الوقود في مفاعلات التوليد السريعة .

## 8-1-1 مفاهيم المفاعل Reactor Concepts

صممت المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة الحرارية والميكانيكية والكهربائية وإنتاج النوى المشعة والمواد المستخدمة في الأسلحة النووية ولإجراء الأبحاث في مجال الفيزياء والكيمياء النووية ... إلخ . ويعتقد تصميم المفاعل على استخداماته فهي حال المفاعلات المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية يتم اختيار التصميم الذي يعطي كهرباء بأرخص الأسعار آخذين بعين الاعتبار جودة التصميم لفترة زمنية طويلة . وقد يعدل التصميم بناءً على توفر والاقتصاد المصادر الوطنية وعلى القوى البشرية والمهارات المتوفرة وعلى أسباب السلامة . كما تسعى الدول الراغبة في الحصول على الأسلحة النووية إلى اختيار نظام المفاعل الوطني الذي يؤمن لها ما تحتاجه من مواد انشطارية وتستطيع أن تضبط عملية تهريب أو انتقال هذه المواد إلى بلدان غير نووية أو منظمات إرهابية (حسب تعريف الدول الخمس النووية) . وفي وقتنا هذا هناك ما لا يقل عن 12 تصميم مستخدم في المفاعلات في العالم .

هناك ثلاث مبادئ رئيسية تدخل في تصميم المفاعل :

أ ( طاقة النيوترونات (مفاعلات حرارية أو سريعة) .

(ب) شكل لب المفاعل (متجانس أو غير متجانس بين الوقود والمبرد)

(ج) الإفادة من الوقود (حراق أو محول أو مولد) .

وقد يتكون اللب في المفاعل المتجانس من مصهور المعدن أو مصهور الملح أو محلول مائي أو محلول عضوي . وأما في المفاعل غير المتجانس فيتكون الوقود من قضبان مملوءة بأكسيد المعدن . وقد تكون مادة الوقود من الذرات القابلة للاشتعال ومن الذرات التي قد يتبع عنها ذرات أخرى قابلة للاشتعال مخطوطة أو مفصولة كأن يكون اللب من الذرات القابلة للاشتعال والبطانة من الذرات التي قد يتبع عنها ذرات أخرى قابلة للاشتعال . ومن المهندسات المستخدمة :  $H_2O$  أو  $D_2O$  أو Be أو الجرافيت أو مليب عضوي . ومن المبريدات المستخدمة : مصهور المعدن أو مصهور الملح أو للماء  $H_2O$  السائل أو الماء الثقيل  $D_2O$  أو المذيب العضوي أو غاز  $CO_2$  أو غاز الهيليوم أو بخار الماء . ويلخص الجدول (3-8) أنواع المفاعلات المختلفة المعروفة والجدول (4-8) الخصائص المهمة لبعض المفاعلات المستخدمة .

AGR	Advanced gas-cooled graphite-moderated reactor
IHWR	Boiling heavy-water-cooled and -moderated reactor
WR	Boiling light-water cooled and -moderated reactor
FBR	Fast breeder reactor
GCFBR	Gas-cooled fast breeder reactor
SCR	Gas-cooled graphite-moderated reactor
ITGR	High temperature gas-cooled graphite-moderated reactor
IWGCR	Heavy-water-moderated gas-cooled reactor
IWLWR	Heavy-water-moderated light-water cooled reactor
WGR	Light-water-cooled graphite-moderated reactor
MFBR	Liquid-metal-cooled fast breeder reactor
OMR	Organic-moderated and -cooled reactor
PHWR	Pressurized heavy-water-moderated and -cooled reactor
PWR	Pressurized light-water-moderated and -cooled reactor
SGR	Sodium-cooled graphite-moderated reactor

جدول 3-8 : أنواع المفاعلات المختلفة باللغة الإنجليزية والاختصار لكل منهم .



## 8-12 Radioactive Wastes المشعة الفضلات

تتجمع نواتج الانشطار والأكتيدات في المفاعلات النووية المثالية في داخل عناصر الوقود ، وهناك ثلاث طرق يمكن من خلالها للمواد المشعة بأن تفادى وعاء المفاعل ومحمولة من قبل المبرد في جميع الحالات :

( أ ) النشاط الإشعاعي المتولد في وسط التبريد .

( ب ) تحتوي نواتج التآكل النشاط الإشعاعي المتولد من مواد البناء .

( ج ) تسرب نواتج الانشطار والأكتيدات من عناصر الوقود التي بها عيوب .  
وبناء على هذا فإن مفاعل HTGR أقرب إلى المفاعل المثالي ، بينما تشكل نواتج النشاط الإشعاعي في مفاعلي BWR و PWR مصدر قلق كبير . وتقسم الفضلات المشعة إلى فضلات غازية وسائلية وصلبة .

### 8-12-1 Gaseous Wastes الغازية الفضلات

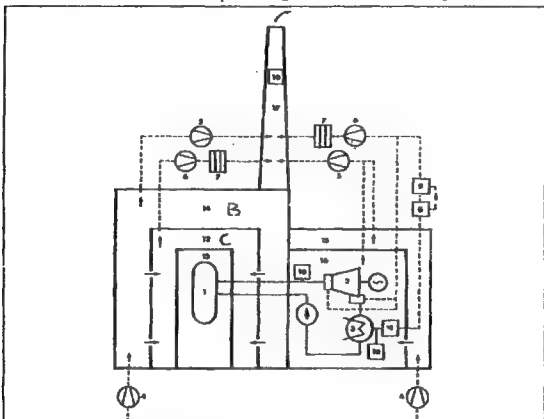
يتسبب فيض النيوترونات السريعة والحرارية العالي في إنتاج عدة أنشطة إشعاعية في الماء الخفيف  $H_2O$  هي :

$^2H(n,\gamma)^3H$  و  $^{16}O(n,p)^{16}N$  و  $^{18}O(n,\gamma)^{18}O$  و  $^{18}O(n,p)^{18}F$  . ويتج  $^{13}N$  المشع من تفاعلي  $^{13}C(n,p)^{13}N$  و  $^{14}N(n,2n)^{13}N$  ، ويأتي الكربون من الفولاذ و  $CO_2$  والنيروجين من الماء . ويتج  $^{14}C$  من تفاعلات  $^{13}C$  و  $^{14}N$  (الذائب في الوقود بتركيز 10-60 ppm) و  $^{16}O$  ، وتقدر الكمية الناتجة بحوالي 10-20 كوري  $^{14}C$  لكل غيغا واط كهرباء/سنة . ونتيجة لوجود B و Li و Ar في ماء التبريد تحدث التفاعلات التالية  $^{10}B(n,2\alpha)^3H$  و  $^6Li(n,\alpha)^3H$  و  $^{40}Ar(n,\gamma)^{41}Ar$  . وتزاح كمية الزيتيوم في مفاعل PWR من 1-10 كوري/م<sup>3</sup> وذلك لاحتوائه على حامض البوريك ، وفي مفاعل BWR تصل إلى 10<sup>-3</sup> كوري/م<sup>3</sup> .

الفرع	نمط المفاعل	القدرة	الغلاف	المبرد	المبرد	درجة حرارة المبرد	ضغط المبرد	صافي الكفاءة	الاستمرارية	الحرارة	حجم القلب
Type	Example	Power (MW <sub>e</sub> )	Fuel (enrichm. %)	Cladding	Coolant	Coolant temp. (°C)	Coolant press. (MPa)	Net eff. (%)	Burn-up (MWd/t <sup>1</sup> )	Temp. coeff.	Core size (kg m <sup>2</sup> )
PWR	Diablo Canyon, USA	1100	88 t UO <sub>2</sub> (2.5)	Zr	H <sub>2</sub> O	317	16	32	33 000	-Neg.	3.7×3.4
PWR	Novovoronezh, USSR	1000	75 t UO <sub>2</sub> (-4)	Zr	H <sub>2</sub> O	322	16	32	26 500	-Neg.	3.5×3.1
BWR	Fornmark, Sweden <sup>(1)</sup>	900	140 t UO <sub>2</sub> (2.6)	Zr	H <sub>2</sub> O	290	7	34	30 000	-Neg.	3.6×4.5
PHWR	Brue 1, Canada	746	129 t UO <sub>2</sub> (nat.)	Zr	D <sub>2</sub> O	304	8.7	30	9 800	+Pos.	5.9×7.1
GCR	Wylfa, UK	655	595 t U (-2)	Mg	CO <sub>2</sub>	414	2.8	26	1 900	+Pos.	9.2×17.4
AGR	Hinkley Point B, UK	620	129 t UO <sub>2</sub> (-2)	St	CO <sub>2</sub>	645	4	42	18 000	+pos.	8.3×9.1
HTGR	Fort St Vrain, USA	330	1 t U <sub>2</sub> C (93), 20 t ThC	C	He	770	5	39	100 000	-Neg.	5.9×4.8
LMPBR	Phenix, F	233	0.2 PuO <sub>2</sub> , 4 t UO <sub>2</sub> (0.3)	St	Na	510	0.1	41	70 000	-Neg.	0.9×1.4

جدول 8-4 : خواص مفاعلات الطاقة المستخدمة في العالم.

ويلاحظ أن هذه الأنوية المشعة الناتجة نصف عمر قليل ، أي أنها تتحلل إلى نواتج مستقرة من خلال أشعة جاما ذات الطاقة العالية . تنتقل الغازات المشعة في مفاعلات BWR مع البخار إلى التوربينات ، حيث يتحلل جزء منها هناك مما يؤدي إلى زيادة في النشاط الإشعاعي في هذا الجزء من المفاعل ولا يسمح للأشخاص العاملين هناك في البقاء طويلاً حفاظاً على سلامتهم .



شكل 17-8 : نظام تنقية الغاز والتهوية في مفاعل BWR

- (1) مفاعل (2) التوربين (3) مكثف التوربين (4) مرلوح التهوية (5) مرلوح إخراج الهواء النقي
- (6) مرلوح إخراج الهواء الملوث (7) مصافي معدنة (8) خزانات تأخير (9) فاصل للغازات البلية
- (10) جهاز لقياس النشاط الإشعاعي (11) طارد فراغي (12) فراغ في مبنى المفاعل C (13) وعاء للمفاعل
- (14) فراغ في مبنى المفاعل B (15) فراغ في مبنى التوربين (16) حاوي التوربين (17) مجموعة .

ولتقليل التلوث الناجم عن النواتج الغازية المنقولة مع البخار لأبد من توفر نظام تصريف وشفط فاعلين في موقع المكثف في التوربين . وبهذا يزال النشاط الإشعاعي قبل أن تتم عملية الإمساك بالغازات من قبل المصافي المكونة من عدة طبقات من مادة ماصة كالفحم . ويحتوي نظام التهوية على مصافي وظيفتها التقاط أي نشاط إشعاعي يتسرب خارج المفاعل والتوربين لأن لا يتسرب إلى البيئة المحيطة مع الهواء الخارج . ويبين الشكل (8-17) نظام تنقية الغاز الموجود في مفاعل BWR . وإذا انطلقت نواتج الانشطار من عناصر الوقود التي بها عيوب (المعوية)، فإن أول ما يظهر في ماء التبريد  $^{133}\text{Xe}$  و  $^{135}\text{Xe}$  و  $^{85}\text{Kr}$  و  $^{133}\text{I}$  ... إلخ. وتحفظ مصافي الفحم بالغازات النبيلة ويزال اليود بعدة طرق منها مصافي الفحم المشعة بيوديد البوتاسيوم أو مصافي الزيولايت المشبعة بنترات الفضة . وهناك أيضاً بعض الأنوية المشعة في البخار مثل  $^{24}\text{Na}$  ونواتج التآكل ونواتج الانشطار مثل  $^{91}\text{Sr}$  و  $^{99}\text{Tc}$  و  $^{137}\text{Cs}$  . وتظهر هذه الأنوية على هيئة الرذاذ ، ويلخص الجدول (5-8) الغازات المنطلقة من مفاعلات BWR ، PWR التجارية الألمانية والتي تشكل  $\geq 1\%$  من القيم المسموح بها بيتياً . ويبين الشكل (8-18) تفاصيل الفضلات الغازية .



## 8-12-2 الفضلات السائلة Liquid Wastes

تظهر نواتج الانشطار والتآكل على هيئة أيونات ذائبة أو راسبة في المخارة وذلك حسب الظروف الكيميائية والمائية . ومن أهم نواتج التآكل  $^{59}\text{Fe}$  و  $^{51}\text{Cr}$  و  $^{58}\text{Co}$  و  $^{60}\text{Co}$  و  $^{65}\text{Zn}$  و  $^{124}\text{Sb}$  ومن أهم نواتج الانشطار  $^{131}\text{I}$  و  $^{134}\text{Cr}$  و  $^{137}\text{Cs}$  . وتتطلق بقية نواتج الانشطار والأكثيدات بكميات صغيرة حسب نوع وحجم تسرب عنصر الوقود . ويتم إزالة هذه النواتج باستمرار من قبل دائرة التبريد . وفي مفاعلات PWR يسحب تيار من السائل باستمرار من المبرد في الدائرة الرئيسية الموجودة في الجهة الخلفية لمبادل الحرارة الرئيسي . وبعد التبريد في مبادل حراري آخر يسمح للماء بالمرور في مصفاة (حجم الفتحة  $\mu 25$ ) وفي مبادل أيوني يزيل الأيونات والدقائق . ويبين الشكل (18-8) تفاصيل مجاري الفضلات السائلة مينة سرعة الجريان والنشاط الإشعاعي .

ولقد صمم النظام ليسمح في فصل مجاري الفضلات حسب خواصها وطريقة معالجتها . وتولد كمية كبيرة من الفضلات السائلة عن مولد البخار الثانوي ، كما تتولد أكبر كمية من النشاط الإشعاعي من أنظمة التنقية مثل المصافي والمبادل الأيوني . ويتكون المبادل الأيوني من مادة غير عضوية كالكيسلفوهر Kieselghur أو مبادل أيوني عضوي ، وأكثرها فعالية نظام بودكس Powder الذي يتكون من مسحوق ناعم جداً (~ 400 مش Mesh) من مبادل أيوني عضوي موجب وسالب . وينظر إلى نظام حامض البوريك في مفاعلات PWR على أنه جزء من دائرة التنظيف أو التنقية .

وتحتوي مفاعلات BWR على دائرتي تنقية للسوائل . الأولى بعد المكثف والثانية تسحب تيار صغير من أسفل وعاء المفاعل . وتحتوي تنقية المكثف على

مبادل أيوني كما في PWR . ويتكون نظام تنقية وعاء المفاعل من نظام تبادل أيوني مختلط ومن مواد تنقية أخرى كالمغناتيت والكيسلغوفر . وتبلغ سعة نظام التنقية 50م<sup>3</sup>/الساعة .

يصل النشاط الإشعاعي إلى قيم عالية في أنظمة التنقية ، والحد الأقصى لجرعة الامتصاص لراتنجات التبادل الأيوني العضوية هو 10<sup>8</sup> راد . كما يعاد غسل المصافي وتبديل الراتنجات بطريقة التحكم عن بُعد في حال أظهرت القياسات تسرب كميات كبيرة من الإشعاعات وفي الوقت الحاضر لا تتم عملية التجديد للراتنجات .

وإذا أظهرت المصافي والمبادلات الأيونية قصور في أدائها في تنقية الماء الدائر والماء الذي سيخرج إلى البيئة وجب إضافة نظام تبخير . علماً بأن نظام التبخير من الأجزاء الموجودة في دائرة التحكم بخامض البوريك في مفاعل PWR .

ويبين الجدول (5-8) السوائل المنطلقة من مفاعلي PWR و BWR الألمانية . ولا تتعدى الكميات المنطلقة أجزاء من مئة من القيم المسموح فيها ، وتعزى الزيادة في النشاط الإشعاعي للأنهار إلى النشاط الإشعاعي للماء المنصرف من المفاعل فتصل إلى 3×10<sup>-10</sup> كوري/م<sup>3</sup> في نهر القزr وإلى 1×10<sup>-11</sup> كوري/م<sup>3</sup> في نهر الراين . والكميات المسموح بخروجها إلى البيئة سنوياً هي 10<sup>4</sup> كوري T و 10<sup>2</sup> كوري من الأنوية التي تطلق β و γ و 50 كوري من الأنوية التي تطلق α . وتحسب الآن الكميات المسموح بانطلاقها من كل محطة نووية آخذين بعين الاعتبار بناءها وموقعها والتوزيع السكاني المحيط بها .

مخارج الطاقة Site of power plant	النوع Type	تاريخ التشغيل التجاري First commercial operation	السمعة القمرى Maximum m gross capacity (M We)	المرافق الغازية Gaseous effluents					المرافق السائلة Liquid effluents		
				Aerosols			طويلة العمر Long lived (a)	قصيرة العمر Short lived			
				الغازات Noble gases	السمعة Noble gases	المرافق Short lived					
Gundremmingen	BWR	1966	250	7 400	9	0.008	0.25	2	~100	1.1	125
Lingen	BWR	1968	252	35 000	8.3	0.01	1.3	2	~30	0.045	16
Obrigheim	PWR	1968	345	8 000	0.003	0.026	0.012	3	27	1.3	150
Stade	PWR	1972	662	1 300	n.b.	0.03	0.01	5	15	0.13	114
Würgassen	BWR	1972	670	120	2	0.011	0.001	2	~2	0.89	3.6
Würgassen	Permitted releases			30 000		10.5	0.26			17	300
Biblis A	PWR	1974	1204	1 700	0.047	0.006	0.005	8	~13	0.38	106
Biblis A	Permitted releases			9×10 <sup>5</sup>		3.5	0.7			10	1600

جدول 8-5 : الكميات المنطلقة من محطات الوقود النووية في عام 1975 (في ألمانيا الغربية) .



### 8-12-3 الفضلات الصلبة Solid Wastes

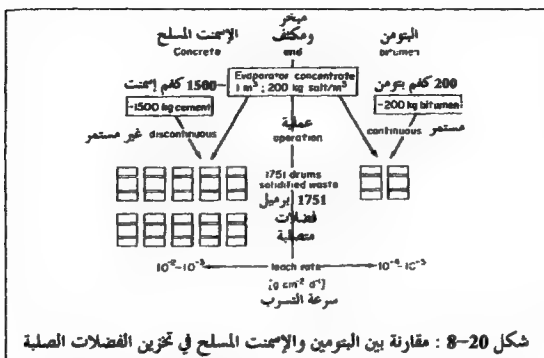
تنتج الفضلات المشعة الصلبة من العديد من مكونات ودوائر تنقية المحطة النووية . ويزال التلوث من العديد من المواد الملوثة بطرق المعالجة المناسبة وذلك لتوفير المال وأماكن تخزين الفضلات . ويتم تركيز المواد الصلبة القابلة للاحتراق باستخدام أجهزة الحرق Incinerator . وتستخدم عدة طرق في تثبيت الفضلات الصلبة بحيث يمكن تخزينها بسلامة وبأقل مراقبة . ولهذا فإنها توضع داخل مواد غير ذاتية تأخذ شكل القطع ذات الحجم والنشاط الإشعاعي الصغيرين وبحيث نستطيع التعامل معها باستخدام الرافعة الشوكية .

وتختلف كميات الفضلات الصلبة من محطة إلى أخرى بناء على الطرق المستخدمة في التنقية والتركيز . ويقدر المعدل السنوي لمفاعل LWR 1000 ميفواط كهرباء من الفضلات الصلبة على النحو التالي :

- 30م<sup>3</sup> ومنتجات التبادل الأيوني المنهكة (المستخدمة كثيراً) (~50% ماء).
  - 20م<sup>3</sup> (~80% ماء) مخلفات التبخير .
  - 60م<sup>3</sup> من المواد المركزة من المصافي والمكثفات .
  - 5 طن من الفضلات الناتجة عن دوائر المفاعل الرئيسية .
  - 200م<sup>3</sup> (~40 طن) من الفضلات ذات النشاط الإشعاعي القليل .
- ويقدر النشاط الإشعاعي في الراتنج بحوالي 200-500 كوري <sup>60</sup>Co و 300-3000 كوري <sup>137</sup>Cs وأقل من 200 كوري <sup>90</sup>Sr وفي المواد المركزة من المصافي والمبخرات بأقل من  $\frac{1}{10}$  من الموجود في الراتنج .



ويوضح الشكل (19-8) عملية تحويل الفضلات إلى مواد صلبة لثبيتها في الإسمنت باستخدام صناديق الإسمنت المسلح الجاهزة . وتصلح هذه الطريقة للأدوات الملوثة والمنشطة وللراتنجات وللبقايا الصلبة ... إلخ . وتؤدي هذه الطريقة إلى الزيادة في حجم الفضلات بحوالي من 4 إلى 40 مرة من الفضلات غير المحمية . ومن مزايا الإسمنت المسلح أنه رخيص الثمن ومقاوم للحريق وللتآكل ، إلا أنه يمكن للأيونات المشعة الذائبة في الماء أن تمر عبره بواسطة الماء ، كالسيوم . وقد اقترح العلماء لمعالجة هذه المشكلة إضافة مواد رابطة بلاستيكية إلى الإسمنت المسلح والبتومن لتستخدم كمادة تخزين . وفي حال استخدام البتومن لأبد من إزالة الماء لتقليل حجم الفضلات ومن وضع مخلوط البتومن في براميل فولاذية حجمها من 150-200 لتر وفي حال احتجنا إلى وقاية وحجب أكثر توضع البراميل في أكمام يسهل التخلص منها أو إعادة استعمالها من الإسمنت المسلح أو الحديد أو الرصاص . ويزن كم الرصاص 7طن وسمكه 12سم ويقلل معدل الجرعة السطحية بحوالي  $10^3$  مرة من 100 ريم/الساعة ، والتي تستدعي استخدام التحكم عن بُعد عند التعامل معها في غياب الواقى . ويقارن الشكل (20-8) بين عملية استخدام الإسمنت والبتومن . ومن مزايا البتومن صغر حجم الفضلات وقلة سرعة مرور الأيونات عبره ومن عيوبه قابليته للاحتراق وقلة مقاومته للإشعاعات ، وقد يؤدي احتراقه إلى انطلاق آلاف الكوري من الأنوية طويلة العمر . ويفضل البتومن في حال كانت الفضلات الصلبة ذات نشاط متوسط وقليل ، وهو أفضل مادة تثبتت في الوقت الحاضر .



شكل 20-8 : مقارنة بين البتومين والإسمنت المسلح في تخزين الفضلات الصلبة

وينتج سنوياً حوالي 270 برميل بتومن سعة 200 لتر مملوءة بالفضلات المركزة من مفاعل 1300 ميغاواط كهرباء في ألمانيا ، منها 50 برميل مملوء بالفضلات المتوسطة النشاط الإشعاعي والمخاطة بواقي من الإسمنت المسلح . وإذا لم تحتوي الفضلات المتصلبة على نواتج الانشطار فإن زمن تخزينها 50 عام . وهذه الفترة الزمنية كافية لتحلل الأنوية المشعة مثل  $^{60}\text{Co}$  إلى كميات صغيرة جداً ، مما يسمح بتخزينها في موقع المفاعل . وإذا كانت كمية  $^{90}\text{Sr}$  و  $^{137}\text{Cs}$  والأكثيدات عالية فلا بُد من تخزينها لزمن أطول في مواقع تخزين خاصة . ويفضل فصل هذه النواتج عن بقية الفضلات لإضافتها إلى الفضلات عالية النشاط في مصانع إعادة التصنيع . وأدت الإشعاعات المنطلقة من محطات الطاقة النووية في ألمانيا الغربية (سابقاً) عام 1974 إلى زيادة في الجرعة الكلية التي تتعرض لها الجماهير بحوالي  $>0.01$  ملريم ، وهذه كمية صغيرة يصعب قياسها .

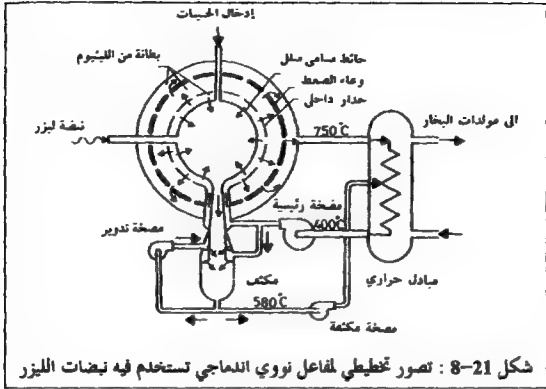
## 13-8 الاندماج النووي Nuclear Fusion

أجبرت مشكلة الفضلات المشعة الإنسان على التفكير في الاندماج النووي كوسيلة لإنتاج الطاقة . وبم هذه العملية عند اندماج نظيرين لكل منهما عدد كلي صغير ، ليكون نظير أثقل منهما . ففاعل الاندماج الذي يحدث في القنبلة الهيدروجينية هو :



وهو أحد التفاعلات التي تجري في الشمس وتساهم في إنتاج الطاقة الشمسية . وبالرجوع إلى الفصل الثاني نجد أن طاقة الاندماج نابعة عن تكون نظير أثقل ، له طاقة ربط نووي لكل نيوكليون أعلى من تلك التي للنظائر الخفيفة الداخلة في عملية الاندماج . كما أن كتلة النظير الناتج أقل من مجموع كتل النظائر المندمجة وهذا الفرق في الكتلة يتحول إلى طاقة حسب معادلة أينشتاين . ونحتاج تفاعلات الاندماج إلى طاقة تنشيط عالية لتغلب على قوى التنافر بين نواة كل من النظائر الخفيفة وغيرها . لهذا لا بد من حدوث الاندماج على درجات حرارة عالية تُكسب نوى النظائر المندمجة طاقة حركية عالية تغلب بها على طاقة التنافر . وقد قدرت درجة الحرارة بحوالي 40 مليون درجة مئوية . والطريقة الوحيدة للحصول على درجة الحرارة تلك هي تفاعل الانشطار . ولهذا تستخدم قبل انشطار لتوفر الظروف للبدء في الاندماج حتى إذا ما بدأ أو استمر ، فإنه يضمن بقاء درجة الحرارة عالية بسبب ما ينتج عنه من طاقة . وهذه العملية ممكنة التطبيق في الاستخدامات العسكرية . إلا أنها صعبة في الاستخدامات السلمية للحصول على الطاقة الكهربائية . لذلك تتركز الأبحاث في الوقت الحاضر على استخدام أشعة الليزر ذات الطاقة العالية للوصول إلى درجات الحرارة العالية الضرورية لبدء عملية الاندماج (الشكل 21-8) ومن مزايا الاندماج التي يفوق بها على الانشطار ما يلي:

- أ - كمية الطاقة الناتجة عن الاندماج أعلى كثيراً من تلك الناتجة عن الانشطار .
- ب- الوقود اللازم للاندماج غير مهدد بأن ينضب ، بينما قد ينضب وقود الانشطار خلال القرون القليلة القادمة .



ومن تفاعلات الاندماج الأخرى ، التفاعل التالي :



ويوجد الديوتيريوم بنسبة 1٪ من الهيدروجين الموجود في الماء الطبيعي . فلو استغل جزء بسيط من الديوتيريوم الموجود في مياه المحيطات لكان كفيلاً بإنتاج طاقة أكبر بمئات الآلاف من المرات من طاقة الانشطار .

ج- ليست هناك خطورة من نواتج الاندماج ، حيث أنها غير مشعة ، وليست هناك مشكلة في عملية التخلص منها .

د - إن عملية التحكم في تفاعل الاندماج سهلة للغاية ، وذلك لأن الوقود لا يوجد في المفاعل ، وإنما تجري إضافته بالتدريج .

تم بحمد الله

المؤلف

والسلام عليكم

TABLE OF NUCLIDES

ملحق - أ

Z	El	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J^\pi$	$\sigma_p(h)$
0	m	1	10.6 m	$\beta^-$ , no $\gamma$	8.071	1/2+	
1	H	1	99.985%		7.289	1/2+	0.352
		2	0.0148%		13.136	1+	$5.2 \times 10^{-4}$
		3	12.33 y	$\beta^-$ , no $\gamma$	14.950	1/2+	$< 6 \times 10^{-6}$ m
2	He	3	$1.38 \times 10^{-6}$ %		14.831	1/2+	$5.33 \times 10^{-5}$ m
		4	99.999998%		2.425	0+	
		6	0.008 s	$\beta^-$ , no $\gamma$	17.587	0+	
		8	0.122 s	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 12%	31.609	0+	
3	Li	6	7.5%		14.087	1+	942 m
		7	87.5%		14.906	3/2-	
		8	0.84 s	$\beta^-$ 2a	20.947	2+	$0.045$ m
		9	0.178 s	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 2a 35%	24.955	(3/2)-	
		11	8.5 ms	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 61%	40.94		
4	Be	7	53.3 d	EC	15.770	3/2-	
		9	100%		11.349	3/2-	$5 \times 10^{-12}$ m
		10	$1.6 \times 10^6$ y	$\beta^-$ , no $\gamma$	12.606	0+	0.006 m
		11	13.6 s	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 3%	20.176	1/2+	$< 0.001$ m
		12	11.4 ms	$\beta^-$ , $\beta^-$ n	25.03	0+	
5	B	10	0.769 s	$\beta^-$ 2a	22.922	2+	
		11	78.6%		12.052	3+	3838 m
		12	60.2%		8.668	3/2-	$0.005$ m
		13	20.4 ms	$\beta^-$ , $\beta^-$ 3a 1.6%	13.370	1+	
		14	17.4 ms	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 0.28%	16.562	3/2-	
		15	16 ms	$\beta^-$	23.657	2-	
6	C	9	0.1265 s	$\beta^-$ n 2a	28.912	(3/2)-	
		10	19.2 s		15.703	0+	
		11	20.36 m	$\beta^-$ 99.76%, EC 0.24%, no $\gamma$	10.650	3/2-	
		12	10.4%		0	0+	0.0034
		13	1.11%		3.125	1/2-	$9 \times 10^{-4}$
		14	5730 y	$\beta^-$ , no $\gamma$	3.020	0+	$< 1 \times 10^{-18}$ m
		15	2.449 s	$\beta^-$	9.873	1/2+	
		16	0.75 s	$\beta^-$ n > 90.6%	13.693	0+	
7	N	12	11.0 ms	$\beta^-$ , $\beta^-$ 3a 3.5%	17.338	1+	
		13	9.96 m	$\beta^-$ , no $\gamma$	5.346	1/2-	
		14	10.63%		2.863	1+	1.82 m
		15	10.4%		0.102	1/2-	$4 \times 10^{-5}$ m
		16	7.13 s	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 0.0012%	5.882	2-	
		17	4.17 s	$\beta^-$ , $\beta^-$ n 95%	7.870	1/2-	
		18	0.63 s	$\beta^-$	13.274	0, 1, 2-	
8	O	13	8.9 ms	$\beta^-$ p	23.105	3/2-	
		14	70.60 s	$\beta^-$	11.023	0+	
		15	122 s	$\beta^-$ 99.89%, EC 0.11%, no $\gamma$	2.855	1/2-	
		16	10.4%		-4.737	0+	$1.8 \times 10^{-18}$ m
		17	0.612%		-0.810	5/2+	$0.235$ m
		18	0.204%		-0.783	0+	$1.6 \times 10^{-4}$
		19	26.9 s	$\beta^-$	3.331	5/2+	
		20	13.5 s	$\beta^-$	3.799	0+	
9	F	17	64.5 s	$\beta^-$ , no $\gamma$	1.952	5/2+	
		18	109.8 m	$\beta^-$ 96.9%, EC 3.1%, no $\gamma$	0.872	1+	
		19	100%		-1.467	1/2+	0.010 m
		20	11.0 s	$\beta^-$	-0.017	2+	
		21	4.32 s	$\beta^-$	-0.047	5/2+	
		22	4.23 s	$\beta^-$	2.826	4+	
		23	2.2 s	$\beta^-$	3.35	(3/2)+	
10	Ne	17	0.109 s	$\beta^-$ p	16.478	1/2-	
		18	1.67 s		5.319	0+	
		19	17.3 s	$\beta^-$ 99+%, EC 0.102%	1.751	1/2+	
		20	90.51%		-7.043	0+	0.036 m
		21	0.27%		-5.733	3/2+	0.7 m

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J\pi$	$\sigma_n(b)$
10	Ne	22	$^{22}\text{Ne}$	9.22%		-8.026	0+	0.05 <sup>m</sup>
		23	$^{23}\text{Ne}$	37.6 s	$\beta^-$	-5.155	5/2+	
		24	$^{24}\text{Ne}$	3.38 m	$\beta^-$	-5.949	0+	
		25	$^{25}\text{Ne}$	0.60 s	$\beta^-$	-2.15	(1/2)+	
11	Na	20	$^{20}\text{Na}$	0.446 s	$\beta^+, \beta^+e$ 21%	6.844	2+	
		21	$^{21}\text{Na}$	22.47 s	$\beta^+$	-2.186	3/2+	
		22	$^{22}\text{Na}$	2.602 y	$\beta^+$ 90.5%, EC 9.5%	-5.184	3+	3.2 $\times 10^4$
		23	$^{23}\text{Na}$	100%		-9.530	3/2+	0.43 <sup>m</sup> 0.10 <sup>g</sup>
		24	$^{24}\text{Na}$	15.02 h	$\beta^-$	-8.418	4+	
		24m	$^{24m}\text{Na}$	20.2 ms	IT, $\beta^-$ (weak)	7.945	1+	
		25	$^{25}\text{Na}$	60 s	$\beta^-$	-9.357	5/2+	
		26	$^{26}\text{Na}$	1.07 s	$\beta^-$	-6.888	3+	
		27	$^{27}\text{Na}$	0.30 s	$\beta^-, \beta^-n$ 0.08%	-5.63	3/2, 5/2+	
		28	$^{28}\text{Na}$	31 ms	$\beta^-, \beta^-n$ 0.6%	-1.13	1+	
		29	$^{29}\text{Na}$	43 ms	$\beta^-, \beta^-n$ 15%	2.66		
		30	$^{30}\text{Na}$	54 ms	$\beta^-, \beta^-n$ 33%	8.38		
		31	$^{31}\text{Na}$	17 ms	$\beta^-, \beta^-n$ 30%	10.61		
		32	$^{32}\text{Na}$	14.5 ms	$\beta^-$	16.41		
		33	$^{33}\text{Na}$	0.02 s	$\beta^-$			
12	Mg	21	$^{21}\text{Mg}$	123 ms	$\beta^+, p$	10.912	5/2+	
		22	$^{22}\text{Mg}$	3.86 s	$\beta^+$	0.394	0+	
		23	$^{23}\text{Mg}$	11.3 s	$\beta^+$	-5.471	3/2+	
		24	$^{24}\text{Mg}$	78.99%		-13.931	0+	0.053 <sup>m</sup>
		25	$^{25}\text{Mg}$	10.00%		-13.191	5/2+	0.18 <sup>m</sup>
		26	$^{26}\text{Mg}$	11.01%		-16.212	0+	0.038
		27	$^{27}\text{Mg}$	9.46 m	$\beta^-$	-14.585	1/2+	0.15 <sup>m</sup>
		28	$^{28}\text{Mg}$	21.0 h	$\beta^-$	-15.016	0+	
		29	$^{29}\text{Mg}$	1.4 s	$\beta^-$	-10.75	(3/2)+	
		30	$^{30}\text{Mg}$	1.2 s	$\beta^-$	-9.79 s	0+	
13	Al	23	$^{23}\text{Al}$	0.47 s	$\beta^+, \beta^+, p$	6.768		
		24	$^{24}\text{Al}$	2.07 s	$\beta^+, \beta^+, a$ 0.0077%	-0.052	4+	
		24m	$^{24m}\text{Al}$	0.13 s	IT 93%, $\beta^+$ 7%, $\beta^+, a$	0.387	1+	
		25	$^{25}\text{Al}$	7.18 s	$\beta^+$	-8.973	5/2+	
		26	$^{26}\text{Al}$	7.2 $\times 10^5$ y	$\beta^+$ 82%, EC 18%	-12.208	5+	
		26m	$^{26m}\text{Al}$	6.36 s	$\beta^+, no \gamma$	-11.979	0+	
		27	$^{27}\text{Al}$	100%		-17.194	5/2+	0.231
		28	$^{28}\text{Al}$	2.24 m	$\beta^-$	-15.048	3+	
		29	$^{29}\text{Al}$	6.8 m	$\beta^-$	-18.212	5/2+	
		30	$^{30}\text{Al}$	3.69 s	$\beta^-$	-15.89	(2,3)+	
		31	$^{31}\text{Al}$	0.64 s	$\beta^-$	-15.10	5/2, 3/2+	
14	Si	25	$^{25}\text{Si}$	0.22 s	$\beta^+, \beta^+, p$	3.824	3/2, 5/2+	
		26	$^{26}\text{Si}$	2.21 s	$\beta^+$	-7.143	0+	
		27	$^{27}\text{Si}$	4.13 s	$\beta^+$	-12.385	5/2+	
		28	$^{28}\text{Si}$	92.23%		-21.491	0+	0.17 <sup>m</sup>
		29	$^{29}\text{Si}$	4.67%		-21.884	1/2+	0.10 <sup>m</sup>
		30	$^{30}\text{Si}$	1.10%		-24.432	0+	0.10%
		31	$^{31}\text{Si}$	2.62 h	$\beta^-$	-22.946	3/2+	0.5 <sup>m</sup>
		32	$^{32}\text{Si}$	~650 y	$\beta^-, no \gamma$	-24.092	0+	
		33	$^{33}\text{Si}$	6.2 s	$\beta^-$	-20.57		
		34	$^{34}\text{Si}$	2.8 s	$\beta^-$	-19.85	0+	
15	P	28	$^{28}\text{P}$	270 ms	$\beta^+$	-7.160	3+	
		29	$^{29}\text{P}$	4.1 s	$\beta^+$	-16.949	1/2+	
		30	$^{30}\text{P}$	2.50 m	$\beta^+, EC$	-20.204	1+	
		31	$^{31}\text{P}$	100%		-24.440	1/2+	0.18 <sup>m</sup>
		32	$^{32}\text{P}$	14.26 d	$\beta^-, no \gamma$	-24.305	1+	
		33	$^{33}\text{P}$	25.3 d	$\beta^-, no \gamma$	-26.337	1/2+	
		34	$^{34}\text{P}$	12.4 s	$\beta^-$	-24.55	1+	
		35	$^{35}\text{P}$	47 s	$\beta^-$	-24.94	(1/2, 3/2)+	
16	S	28	$^{28}\text{S}$	0.19 s	$\beta^+, \beta^+, n$	-3.16	5/2+	
		29	$^{29}\text{S}$	1.2 s	$\beta^+$	-14.062	0+	
		31	$^{31}\text{S}$	2.6 s	$\beta^+$	-19.044	1/2+	
		32	$^{32}\text{S}$	95.02%		-26.015	0+	0.53 <sup>m</sup>
		33	$^{33}\text{S}$	0.75%		-26.586	3/2+	0.09 <sup>m</sup>
		34	$^{34}\text{S}$	4.71%		-29.931	0+	0.24 <sup>m</sup>
		36	$^{36}\text{S}$	87.4 d	$\beta^-, no \gamma$	-28.846	3/2+	



TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(h)$
16	S	36	0.017%		-30.666	0+	
		37	5.0 m	$\beta^-$	-26.908	5/2, 7/2-	0.15 <sup>m</sup>
		38	170 m	$\beta^-$	-26.862	0+	
17	Cl	32	298 ms	$\beta^-, \beta^+ p \approx 0.007\%$ , $\beta^+ n \approx 0.01\%$	-13.329	1+	
		33	2.51 s	$\beta^-$	-21.003	3/2+	
		34	1.526 s	$\beta^-, no \gamma$	-24.438	0+	
		34m	32.0 m	$\beta^+ 5.3\%, IT 47\%$	-24.292	3+	
		35	75.77%		-29.014	3/2+	43
		36	3.00 $\times 10^5$ y	$\beta^- 96.1\%, EC 1.9\%$ , $\beta^+ 0.0017\%, no \gamma$	-29.522	2+	<1 <sup>m</sup>
		37	24.28%		-31.762	3/2+	0.428 <sup>m</sup> 0.005 <sup>m</sup>
		38	37.3 m	$\beta^-$	-29.798	2-	
		38m	0.715 s	IT	-29.127	5-	
		39	56 m	$\beta^-$	-29.803	3/2+	
		40	1.35 m	$\beta^-$	27.54	2-	
		40m	0.10 s <sup>o</sup>	$\beta^+$	-27.40	(1/2, 3/2)+	
		41	34 s	$\beta^-$	-9.365	1/2+	
18	Ar	33	0.18 s	$\beta^+, \beta^+ p 34\%$	-18.379	0+	
		34	0.844 s	$\beta^+$	-23.049	3/2+	
		36	1.78 s	$\beta^+$	-30.231	0+	5 <sup>m</sup>
		37	0.137%		-30.948	3/2+	
		38	35.0 d	EC, no $\gamma$	-34.715	0+	
		39	0.063%		-33.241	1/2-	0.8 <sup>m</sup> 600 <sup>m</sup>
		40	269 y	$\beta^-, no \gamma$	-35.040	0+	0.64
		41	99.60%		-34.42	7/2-	0.5 <sup>m</sup>
		42	1.83 h	$\beta^-$	-31.98	0+	
		43	33 y	$\beta^-, no \gamma$	-32.271	0+	
		44	5.4 m	$\beta^+$	-17.426	2+	
19	K	36	11.9 m	$\beta^-$	-24.799	3/2+	
		37	0.34 s	$\beta^+$	-28.802	3+	
		38	1.23 s	$\beta^+$	-26.671	0+	
		38m	7.61 m	$\beta^+, no \gamma$	-33.806	3/2+	2.1 <sup>m</sup>
		39	0.93 s	$\beta^+, no \gamma$	-33.535	4-	70 <sup>m</sup>
		40	0.0117%	$\beta^- 89.3\%, EC 10.7\%$ , $\beta^+ 0.0010\%$	-35.560	3/2+	1.46
		41	1.26 $\times 10^5$ y	$\beta^+$	-35.023	2-	
		42	6.28%		-36.599	3/2+	
		43	12.36 h	$\beta^-$	-35.807	2-	
		44	22.3 h	$\beta^-$	-36.611	3/2+	
		46	22.1 m	$\beta^-$	-35.420	(2-)	
		48	20 m	$\beta^-$	-35.698	1/2+	
		49	115 s	$\beta^-$	-32.22	(2-)	
		47	17.5 s	$\beta^-$	-23.57 s		
		48	6.0 s	$\beta^-$	-13.164	3/2+	
		49	32 s <sup>o</sup>	$\beta^-$	-22.060	0+	
		50	$\approx 0.3$ s <sup>o</sup>	$\beta^-$	-27.262	3/2+	
20	Ca	37	0.173 s	$\beta^-, \beta^+ p$	-34.847	0+	0.4 <sup>m</sup>
		38	0.44 s	$\beta^+$	-35.138	7/2-	
		39	0.06 s	$\beta^+, no \gamma$	-36.544	0+	0.7 <sup>m</sup>
		40	96.94%		-38.405	7/2-	
		41	1.0 $\times 10^5$ y	EC, no $\gamma$	-41.466	0+	0.66
		42	0.647%		-40.810	7/2-	
		43	0.135%		-43.138	0+	0.7 <sup>m</sup>
		44	2.02%		-42.343	7/2-	
		46	165 d	$\beta^-$	-44.216	0+	
		48	0.00153%		-41.286	(3/2)-	1.1 <sup>m</sup>
		47	4.538 d	$\beta^-$	-39.572	0+	
		49	0.187%		-20.527	4-	
		50	8.72 m	$\beta^-$	-26.644	7/2-	
		51	14 s	$\beta^-$	-32.121	0+	
21	Sc	40	182 ms	$\beta^-, \beta^+ p$	-31.593	7+	
		41	0.596 s	$\beta^+, no \gamma$			
		42	682 s	$\beta^+, no \gamma$			
		42m	62.0 s	$\beta^+$			

# TABLE OF NUCLIDES

Z	Element	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	A (MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(h)$
21	Sc					
43		3.89 h	$\beta^+$ +EC	-36.185	7/2-	
44		3.83 h	$\beta^+$ 85%, EC 5%	-37.811	2+	
44m		2.44 d	IT 99.61%, EC 1.39%	-37.540	6+	
45		100%		-41.066	7/2-	17 <sup>n</sup> 9 <sup>n</sup>
45m		0.31 s	IT	-41.054	3/2+	
46		83.80 d	$\beta^-$	-41.756	4+	8 <sup>n</sup>
46m		18.7 s	IT	-41.613	1-	
47		3.42 d	$\beta^-$	-44.330	7/2-	
48		43.7 h	$\beta^-$	-44.490	6+	
48		3 M?	$\beta^-$			
49		57.0 m	$\beta^-$	-46.555	(7/2)-	
50		1.71 m	$\beta^-$	-44.539	(5)+	
50m		0.35 s	IT	-44.282	(2)+	
51		12.4 s	$\beta^-$	-43.220	(7/2)-	
22	Ti					
41		80 ms	$\beta^0$	-15.78	3/2+	
42		0.20 s	$\beta^+$	-25.122	0+	
43		0.49 s	$\beta^+$ , no $\gamma$	-29.324		
44		47 y	EC	-37.546	0+	
45		3.09 h	$\beta^+$ , EC	-39.004	7/2-	
46		4.2%		-44.123	0+	0.6 <sup>n</sup>
47		7.4%		-44.931	5/2-	1.7 <sup>n</sup>
48		23.7%		-48.400	0+	7.9 <sup>n</sup>
49		5.4%		-48.569	7/2-	2.1 <sup>n</sup>
50		5.2%		-51.432	0+	0.179
51		5.80 m	$\beta^-$	-49.733	3/2-	
52		1.7 m	$\beta^-$	-49.469	0+	
53		33 s	$\beta^-$	-46.84	(3/2)-	
23	V					
44		0.09 s	[ $\beta^+$ ], $\beta^+$ a	-23.85 s		
46		0.423 s	$\beta^+$ , no $\gamma$	-37.071	0+	
47		32.6 m	$\beta^+$ +EC	-42.001	3/2-	
48		15.976 d	EC 50.4%, $\beta^+$ 49.6%	-44.473	4+	
49		330 d	EC, no $\gamma$	-47.957	7/2-	
50		0.250%		-49.219	6+	
51		89.750%		-52.199	7/2-	50 4.88
52		3.76 m	$\beta^-$	-51.439	3+	
53		1.6 m	$\beta^-$	-51.863	7/2-	
54		43 s	$\beta^-$	-49.93		
24	Cr					
46		0.05 s	$\beta^0$	-19.46	[7/2-]	
48		0.26 s	$\beta^+$ , no $\gamma$	-29.461	0+	
49		21.56 h	EC	-42.818	0+	
50		41.9 m	$\beta^+$ , EC	-45.329	5/2-	
51		4.35%		-50.250	0+	15.9
52		27.70 d	EC	-51.448	7/2-	
53		0.17%		-55.415	0+	0.8 <sup>n</sup>
54		8.50%		-55.284	3/2-	18 <sup>n</sup>
55		2.36%		-56.931	0+	0.38 <sup>n</sup>
56		3.55 m	$\beta^-$	-55.106	3/2-	
56		5.9 m	$\beta^-$	-55.263	0+	
25	Mn					
50		0.101 s	$\beta^+$ , no $\gamma$	-42.626	0+	
50m		1.74 m	$\beta^+$	-42.40	5+	
51		46.2 m	$\beta^+$ +EC	-48.240	5/2-	
52		5.59 d	EC 72%, $\beta^+$ 28%	-50.704	6+	
52m		21.1 m	$\beta^+$ +EC 98.25%, IT 1.75%	-50.326	2+	
53		3.7 $\times 10^6$ y	EC, no $\gamma$	-54.087	7/2-	70 <sup>n</sup>
54		312 d	EC	-55.554	3+	<10 <sup>n</sup>
55		100%		-57.710	5/2-	13.3
56		2.579 h	$\beta^-$	-56.909	3+	
57		1.6 m	$\beta^-$	-57.487	5/2-	
58		65 s	$\beta^-$	-55.802	3+	
58		3.0 s	$\beta^+$ , no $\gamma$	-55.832	(0+)	
26	Fe					
48		0.07 s	[ $\beta^+$ ], $\beta^+$ p	-24.47		
50		8.27 h	$\beta^+$ 57%, EC 43%	-48.332	0+	
55		8.51 m	$\beta^+$ , EC	-50.944	7/2-	
59m		2.53 m	IT	-47.904	19/2-	

# TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide E	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	A(MeV)	J $\pi$	$a_n(b)$
26	Fe	54	5.8%		-56.251	0+	2.2 <sup>n</sup>
		55	2.7 y	EC, no $\gamma$	-57.479	3/2-	
		56	91.8%		-60.604	0+	2.6 <sup>n</sup>
		57	2.15%		-60.179	1/2	2.4 <sup>n</sup>
		58	0.28%		-62.152	0+	1.14
		58	44.6 d	$\beta^-$	-60.661	3/2-	
		60	$3 \times 10^5$ y	$\beta^-$	-61.437	0+	
		61	6.0 m	$\beta^-$	-59.01	(3/2)-	
		62	60 s	$\beta^-$	-58.86	0+	
		63	0.26 s	$\beta^+$ , no $\gamma$	42.640	[7/2-]	
27	Co	53m	0.25 s	$\beta^+$ ~98.5%, $\beta^-$ ~1.5%	39.453	[19/2-]	
		54	193.2 ms	$\beta^+$ , no $\gamma$	-48.010	0+	
		54m	1.46 m	$\beta^+$	-47.811	(7+)	
		56	17.5 h	$\beta^-$ 77%, EC 23%	-54.024	7/2-	
		58	70.8 d	EC 81%, $\beta^+$ 19%	-56.037	4+	
		57	271 d	EC	-59.342	7/2	
		58	70.8 d	EC 85.00%, $\beta^+$ 15.00%	-59.844	2+	1.9 $\times 10^3$
		58m	9.2 h	IT	-59.819	5+	1.4 $\times 10^3$
		59			-62.226	7/2-	19 <sup>m</sup>
		60	5.271 y	$\beta^-$	-61.647	5+	2.0 <sup>nc</sup>
28		60m	10.5 m	IT 99.75%, $\beta^-$ 0.25%	-61.588	2+	58 <sup>nc</sup>
		61	4.65 h	$\beta^-$	-62.087	7/2-	
		62(g)	1.50 m	$\beta^-$	-61.430	(2+)	
		62(m)	13.9 m	$\beta^-$	-61.408	(5+)	
		63	27.5 s	$\beta^-$	-61.850	7/2, 5/2-	
		64	0.3 s	$\beta^-$	-59.791	(1+)	
		53	0.05 s	[ $\beta^+$ ], $\beta^+$ p	-29.41	[7/2-]	
		56	6.10 d	EC	-53.902	0+	
		57	36.0 h	EC 60%, $\beta^+$ 40%	-58.077	3/2-	
		58	68.3%		-60.224	0+	4.6 <sup>n</sup>
29		59	$7.5 \times 10^4$ y	EC 99+%, $\beta^+$ $1.5 \times 10^{-5}$ %, no $\gamma$	-61.153	3/2-	92 <sup>a</sup>
		60	26.1%		-64.470	0+	2.8 <sup>nc</sup>
		61	1.18%		-64.219	3/2-	2 <sup>nc</sup>
		62	3.58%		-66.745	0+	14.2
		63	106 y	$\beta^-$ , no $\gamma$	-65.513	1/2	23 <sup>nc</sup>
		64	0.91%		-67.098	0+	1.49
		65	2.520 h	$\beta^-$	-65.124	5/2-	24 <sup>nc</sup>
		66	54.6 h	$\beta^-$ , no $\gamma$	-66.021	0+	
		67	18 s	$\beta^-$	-63.47		
		58	3.20 s	$\beta^+$	-51.662	1+	
29	Cu	62	82 s	$\beta^+$	-56.352	3/2-	
		60	23.4 m	$\beta^+$ 93%, EC 7%	-58.343	2+	
		61	3.41 h	$\beta^+$ 62%, EC 38%	-61.981	3/2-	
		62	9.73 m	$\beta^+$ 97.6%, EC 2.2%	-62.796	1+	
		63	69.2%		-65.578	3/2-	4.4
		64	12.70 h	EC 41%, $\beta^+$ 19%, $\beta^-$ 40%	-65.423	1+	
		65	30.8%		-67.262	3/2-	2.17
		66	5.10 m	$\beta^-$	-66.257	1+	140 <sup>nc</sup>
		67	61.9 h	$\beta^-$	-67.305	3/2-	
		68	31 s	$\beta^-$	-65.39	1+	
30		68m	3.8 m	IT 86%, $\beta^-$ 14%	-64.86	(6-)	
		69	3.0 m	$\beta^-$	-65.94	(3/2)-	
		70(g)	5 s	$\beta^-$	-63.39	1+	
		70(m)	47 s	$\beta^-$	-63.25	(3-)	
		57	0.04 s	[ $\beta^+$ ], $\beta^+$ p	-32.61	[7/2-]	
		60	2.4 m	$\beta^+$ ~97%, EC ~3%	-54.184	0+	
		61	69.1 s	$\beta^+$ ~99%, EC ~1%	-56.58	3/2-	
		62	9.2 h	EC 93%, $\beta^+$ 7%	61.169	0+	
		63	30.1 m	$\beta^+$ 93%, EC 7%	-62.211	3/2-	
		64	46.6%		-66.001	0+	0.76
30		66	244.1 d	EC 98.54%, $\beta^+$ 1.46%	-65.910	5/2-	
		68	27.2%		-68.898	0+	1 <sup>nc</sup>

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Q(MeV)	$J^\pi$	$\sigma_a(b)$
30	Zn 67	4.10%		-67.880	5/2-	7 <sup>ns</sup>
	68	18.6%		-70.006	0+	0.81 <sup>g</sup> 0.072 <sup>m</sup>
	69	56 m	$\beta^-$	-68.41	1/2-	
	69m	14.0 h	IT 99+%, $\beta^-$ 0.033%	-67.976	9/2+	
	70	0.62%		-69.560	0+	0.09 <sup>g</sup> 0.0082 <sup>m</sup>
	71	2.4 m	$\beta^-$	-67.374	1/2-	
	71m	3.9 h	$\beta^-$	-67.167	(9/2)+	
	72	46.5 h	$\beta^-$	-68.134	0+	
	73	24 s	$\beta^-$	-65.03		
	74	95 s	$\beta^-$	-65.67	0+	
	75	10.2 s	$\beta^-$	-62.46 s		
	76	5.7 s	$\beta^-$	-62.55	0+	
	77	1.4 s	$\beta^-$	-58.91 s		
	79	2.6 s <sup>g</sup>	$\beta^-n$			
31	Co 62	118 ms	$\beta^-$	51.77 s	(0+)	
	63	32 s	$\beta^-$	-56.69	3/2,5/2-	
	64	2.62 m	$\beta^-+EC$	-58.836	0+	
	66	15.2 m	$\beta^-$ 86%, EC 14%	-62.854	3/2-	
	68	9.4 h	$\beta^-$ 56.5%, EC 43.5%	-63.723	0+	
	67	78.3 h	EC	-66.878	3/2-	
	68	68.1 m	$\beta^-$ 90%, EC 10%	-67.085	1+	
	69	60.1%		-69.322	3/2-	1.7
	70	21.1 m	$\beta^-$ 98.8%, EC 0.2%	-68.905	1+	
	71	39.6%		-70.142	3/2-	4.6
	72	14.10 h	$\beta^-$	-68.561	3-	
	73	4.87 h	$\beta^-$	-69.73	(3/2)-	
	74	8.1 m	$\beta^-$	-68.02	(4)-	
	74m	10 s	IT	-67.96	1+	
	75	2.10 m	$\beta^-$	-68.56	(3/2)-	
	76	27. s	$\beta^-$	-66.44	(3-)	
	77	13 s	$\beta^-$	-56.41 s		
	78	5.1 s	$\beta^-$	-53.66		
	79	3.0 s	$\beta^-$	-62.80		
	80	1.66 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-59.53 s		
	81	1.2 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$			
	82	0.60 s <sup>g</sup>	$\beta^-$ , $\beta^-n$			
	83	0.31 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$			
32	Ge 64	64 s	$\beta^-+EC$	-54.43	0+	
	66	31 s	$\beta^-+EC$ , ( $\beta^-+EC$ )p 0.013%	-56.41	3/2,5/2-	
	68	2.3 h	EC 73%, $\beta^+$ 27%	-61.621	0+	
	67	19.0 m	$\beta^-$ 96%, EC 4%	-62.45	(1/2)-	
	68	268 d	EC, no $\gamma$	-66.972	0+	
	69	39.0 h	EC 84%, $\beta^+$ 36%	-67.096	5/2-	
	70	20.5%		-70.561	0+	3.2 <sup>ns</sup>
	71	11.2 d	EC, no $\gamma$	-69.906	1/2-	
	72	27.4%		-72.583	0+	1.0 <sup>ns</sup> 9 <sup>ms</sup>
	73	7.6%		-71.294	9/2+	
	73m	0.50 s	IT	-71.227	1/2-	
	74	36.5%		-73.422	0+	0.4 <sup>ns</sup> 0.16 <sup>ns</sup>
	75	82.8 m	$\beta^-$	-71.856	1/2-	
	75m	48 s	IT 99.97%, $\beta^-$ 0.03%	-71.716	7/2+	
	76	7.6%		-73.214	0+	0.10 <sup>ns</sup> 0.06 <sup>ns</sup>
	77	11.30 h	$\beta^-$	-71.214	7/2(+)	
	77m	53 s	$\beta^-$ 80%, IT 20%	-71.055	1/2-	
	78	1.45 h	$\beta^-$	-71.76	0+	
	79	18 s <sup>g</sup>	$\beta^-$			
	79	42 s	$\beta^-$	-69.56	(1/2)-	
	80	29 s	$\beta^-$	-69.43	0+	
	81	10 s	$\beta^-$	-66.34 s		
	82	4.6 s	$\beta^-$	-65.99 s	0+	
	83	1.9 s	$\beta^-$	-66.25 s		

TABLE OF NUCLIDES

2	Nuclide	Abundance	Decay	A(MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(b)$
	El A	or $t_{1/2}$	Mode			
32	Ge 64	1.2 s	$\beta^-$		0+	
33	As 68	2.6 m	$\beta^+$	-58.77 s		
	69	15 m	$\beta^+$ 98%, EC 2%	-63.12	(5/2)-	
	70	5.3 m	$\beta^+$ 84%, EC 16%	-64.339	4(+)	
	71	61 h	EC 68%, $\beta^+$ 32%	-67.893	5/2-	
	72	26.0 h	$\beta^+$ 77%, EC 23%	-68.232	2-	
	73	60.3 d	EC	-70.949	3/2-	
	74	17.78 d	EC 37%, $\beta^+$ 31%, $\beta^-$ 32%	-70.860	2-	
	75	1028		-73.034	3/2	4.4
	76	26.3 h	$\beta^-$	-72.291	2-	
	77	38.8 h	$\beta^-$	-73.916	3/2-	
	78	91 m	$\beta^-$	-72.74	(2-)	
	79	9.0 m	$\beta^-$	-73.71	3/2-	
	80	16 s	$\beta^-$	-72.06	1(+)	
	81	33 s	$\beta^-$	-72.64	(3/2)-	
	82	14 s	$\beta^-$		(5-)	
	82	19 s	$\beta^-$	-70.39	(1+)	
	83	13 s	$\beta^-$	-69.87		
	84	0.6 s	$\beta^-$	-66.16 s		
	84	5.3 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.1%	-66.16 s	(1-)	
	85	2.03 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 23%	-63.52 s		
	86	0.9 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 44%	-59.7 s		
	87	0.6 s	$\beta^-$	-56.2 s		
34	Se 66	1.6 m	$\beta^+$	-54.17 s	0+	
	68	27.4 s	$\beta^+$ , $\beta^+p$ 0.07%	-56.30		
	70	41.1 m	$\beta^+$ +EC	-61.74 s	0+	
	70m	4 m	$\beta^+$ +EC			
	71	4.9 m	$\beta^+$ +EC	-63.46	(5/2)-	
	72	8.4 d	EC	-67.894	0+	
	73	7.1 h	$\beta^+$ 65%, EC 35%	-68.209	7/2+	
	73m	41 m	IT 73%, ( $\beta^+$ , EC) 27%	-68.183	1/2	
	74	0.87 s		-72.213	0+	52
	75	118.5 d	EC	-72.169	5/2+	
	76	9.08		-75.259	0+	64 s 21 s
	77	7.68		-74.606	1/2-	42 s
	77m	17.4 s	IT	-74.444	7/2+	
	78	23.58		-77.032	0+	0.4 s <sub>exp</sub> 0.3 s <sub>th</sub>
	79	66.5x10 <sup>4</sup> y	$\beta^-$ , no $\gamma$	-75.911	7/2+	
	79m	3.90 m	IT	-75.815	1/2-	
	80	1.13 s		-77.761	0+	0.6 s 0.07 m
	81	16.5 m	$\beta^-$	-76.391	(1/2)-	
	81m	57.3 m	IT 99+%, $\beta^-$ 0.058%	-76.288	(7/2)+	
	82	9.28 1.4x10 <sup>10</sup> y	$\beta^-$	-77.586	0+	0.04 s <sub>exp</sub> 0.006 s
	83	22.5 m	$\beta^-$	-75.333	(9/2)+	
	83m	70 s	$\beta^-$	-75.105	(1/2)-	
	84	3.3 m	$\beta^-$	-75.942	0+	
	85	31 s	$\beta^-$	-72.57 s		
	86	19 s <sup>9</sup>	$\beta^-$			
	86	16 s	$\beta^-$	-70.86 s	0+	
	87	5.8 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.16%	-66.2 s		
	88	1.5 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.8%	-64.09 s	0+	
	89	0.41 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 5%	-59.89 s		
	91	0.27 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 21%			
35	Br 70	23 s <sup>9</sup>	$\beta^+$	-51.29 s		
	71	<1 m <sup>9</sup>	$\beta^+$ +EC	-56.86 s		
	72	1.31 m	$\beta^+$	-59.53 s	(3)	
	73	3.4 m	$\beta^+$ +EC	-63.67	(3/2-)	
	74	25.3 m	$\beta^+$ +EC	-65.295	(0,1-)	
	74	4 m <sup>9</sup>	$\beta^+$			
	74m	41 m	$\beta^+$ +EC	-65.1	(4-)	
	75	96 m	$\beta^+$ 76%, EC 24%	-69.159	(3/2-)	
	76	16.1 h	$\beta^+$ 57%, EC 43%	-70.303	1-	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	A(MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(h)$
35	Br	77	57.0 h	EC 99.26%, $\beta^+$ 0.74%	-73.242	3/2-	
		77m	4.3 m	IT	-73.136	9/2+	
		78	6.46 m	$\beta^+$ 92%, EC 8%, $\beta^-$ 50.01%	-73.458	1+	
		79	50.698		-76.070	3/2-	10.8 g
		79m	4.9 s	IT	-75.863	9/2+	2.4 m
		80	17.6 m	$\beta^-$ 91.7%, EC 5.7%, $\beta^+$ 2.6%	-75.881	1+	
		80m	4.42 h	IT	-75.805	5-	
		81	49.318		-77.976	3/2-	2.7 g+m
		82	35.34 h	$\beta^-$	-77.498	5-	
		82m	6.1 m	IT 97.6%, $\beta^-$ 2.4%	-77.452	2-	
		83	2.39 h	$\beta^-$	-79.025	(3/2)-	
		84	31.8 m	$\beta^-$	-77.750	2-	
		84m	6.0 m	$\beta^-$	-77.46	(6-)	
		85	2.9 m	$\beta^-$	-78.67	3/2-	
		86	56 s	$\beta^-$	-75.96	(2-)	
		86	4.5 s <sup>a</sup>	[IT]			
		87	55.6 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 2.3%	-74.21 s	(3/2-)	
		88	16.6 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 6%	-71.09 s	(1-)	
		89	4.4 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 1.3%	-68.09 s		
		90	1.9 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 2.3%	-65.2 s		
		91	0.54 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 9%			
		92	0.36 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 16%	-67.6 s		
36	Kr	72	17 s	$\beta^+$ +EC	-53.87 s	0+	
		73	27 s	$\beta^+$ , $\beta^+n$ 0.7%	-56.98		
		74	11.5 m	$\beta^+$ , EC	-62.02	0+	
		75	4.3 m	$\beta^+$ +EC	-64.16 s		
		76	14.8 h	EC	-69.10	0+	
		77	75 m	$\beta^+$ ~80%, EC ~20%	-70.236	(5/2+)	
		78	0.3568		-74.150	0+	5 g
		79	35.0 h	EC 93%, $\beta^+$ 7%	-74.438	1/2-	0.21 m
		79m	50 s	IT	-74.309	7/2+	..
		80	2.278		-77.887	0+	12 g
		81	2.1x10 <sup>5</sup> y	EC	-77.654	7/2+	5 m
		81m	13 s	IT	-77.464	1/2-	
		82	11.68		-80.591	0+	23 g
		83	11.58		-79.985	9/2+	20 m
		83m	1.83 h	IT	-79.943	1/2-	200
		84	57.68		-82.432	0+	0.09 m
		85	10.7 y	$\beta^-$	-81.472	9/2+	0.042 g
		86m	4.40 h	$\beta^-$ 79%, IT 21%	-81.167	1/2-	1.7
		86	17.38		-83.283	0+	0.06 m
		87	76 m	$\beta^-$	-80.707	(5/2)+	
		88	2.84 h	$\beta^-$	-79.680	0+	
		89	3.18 m	$\beta^-$	-78.79		
		90	32.3 s	$\beta^-$	-75.18	0+	
		91	0.6 s	$\beta^-$	-71.77		
		92	1.84 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.032%	-69.15	0+	
		93	1.29 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 1.9%	-65.8		
		94	0.20 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 6%	-61.32 s	0+	
		95	0.78 s	[ $\beta^-$ ]			
37	Rb	74	65 ms	$\beta^+$ , no $\gamma$	-51.43 s	(0+)	
		75	18 s	$\beta^+$	-57.51		
		76	38 s	$\beta^+$	-60.61		
		77	5.9 m	$\beta^+$ +EC	-65.11	(5/2-)	
		78	18 m	$\beta^+$ +EC	-68.8		
		78m	8 m	$\beta^+$ +EC, IT	-68.7		
		79	23.0 m	$\beta^+$ 94%, EC 16%	-70.86	(3/2, 5/2-)	
		80	34 s	$\beta^+$	-72.190	1+	
		81	4.56 h	EC 73%, $\beta^+$ 27%	-75.382	3/2-	
		81m	32 m	$\beta^+$ +EC, IT	-75.307	9/2+	

# TABLE OF NUCLIDES

	Nuclide	Abundance	Decay	M(MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(h)$
	Z	El	A	or $t_{1/2}$	Mode	
37 Rb	82	1.25 m	$\beta^+$ 96%, EC 4%	-76.213	1+	
	82m	6.2 h	EC 74%, $\beta^+$ 26%	-76.1	5-	
	83	86.2 d	EC	-78.914	5/2-	
	84	32.9 d	EC 75%, $\beta^+$ 22%, $\beta^-$ 3.0%	-79.752	2-	12 <sup>ns</sup>
	84m	20.5 m	IT	-79.288	(6+)	
	85	72.17% 18.8 d	$\beta^-$ 99+%, EC 0.005%	-82.150	5/2-	0.40 <sub>g</sub> 0.047 <sub>m</sub>
	86	1.02 m	IT	-82.182	6-	
	87	27.83% 4.8 $\times 10^{10}$ y	$\beta^-$ , no $\gamma$	-84.596	3/2-	0.12 <sup>ns</sup>
	88	17.8 m	$\beta^-$	-82.602	2-	1.0 <sup>ns</sup>
	89	15.2 m	$\beta^-$	-81.717	(3/2-)	
	90	153 s	$\beta^-$	-79.57	(1-)	
	90m	258 s	$\beta^-$ , IT	-79.46	(4-)	
	91	50 s	$\beta^-$	-77.97		
	92	4.52 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.012%	-75.12	(1-)	
	93	5.85 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 1.3%	-72.92		
	94	2.72 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 10%	-68.82		
	95	0.36 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 8.4%	-66.55		
	96	0.201 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 13%	-62.77 s		
	97	0.170 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 27%			
	98	0.13 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 13%			
	99	76 ms	[ $\beta^-$ ]			
38 Sr	77	9 s	$\beta^+$ , $\beta^+p$ 60.25%	-57.96		
	78	31 m	$\beta^+$ +EC	-65.5 s	0+	
	79	8.1 m	$\beta^+$ +EC	-65.46 s		
	79	4 m?	$\beta^+$ +EC			
	80	106 m	EC+ $\beta^+$	-70.39 s	0+	
	81	26 m	$\beta^+$ 80.7%, EC 19.3%	-71.40	(1/2-)	
	82	25.0 d	EC, no $\gamma$	-75.999	0+	
	83	32.4 h	EC 76%, $\beta^+$ 24%	-76.664	7/2+	
	83m	5.0 s	IT	-76.405	1/2-	
	84	0.56% 64.8 d	EC	-80.641	0+	0.6 <sub>m</sub> <sup>sc</sup> 0.3 <sub>g</sub>
	85	60 m	IT 87%, EC 13%	-81.095	9/2+	
	86	8.0% 60 m	IT 87%, EC 13%	-80.856	1/2-	
	87	7.0% 2.80 h	$\beta^-$ 99.7%, EC 0.3%	-84.512	0+	0.84 <sub>m</sub> <sup>sc</sup>
	87m	02.6% 50.5 d	IT 99.7%, EC 0.3%	-84.868	9/2+	
	88	28.8 y	$\beta^-$	-84.480	1/2-	0.0057 <sup>ns</sup>
	89	9.5 h	$\beta^-$ , no $\gamma$	-87.911	0+	0.42 <sup>ns</sup>
	90	2.71 h	$\beta^-$	-86.203	5/2+	
	91	7.4 m	$\beta^-$	-85.935	0+	
	92	75 s	$\beta^-$	-83.666	5/2+	
	93	24.4 s	$\beta^-$	-82.892	0+	
	94	1.1 s	$\beta^-$	-80.26		
	95	0.40 s	$\beta^-$	-78.96	0+	
	96	0.7 s	$\beta^-$	-75.14		
	97	0.8 s	$\beta^-$	-73.07	0+	
	98	5 m	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 3%	-69.08 s	0+	
	99	12 m?	[ $\beta^-$ ]	-67.38 s		
38 Y	81	1.1 m	$\beta^+$ +EC	-67.91 s		
	82	2.85 m	$\beta^+$ 80%, EC 20%	-72.36 s	(9/2+)	
	83	39 m	$\beta^+$ +EC	-72.36 s	(1/2)-	
	84	4.6 s	$\beta^+$ +EC	-73.682	(1+)	
	85(a)	2.7 h	$\beta^+$ 55%, EC 45%	-77.855	(1/2)-	
	85(m)	4.9 h	$\beta^+$ 70%, EC 30%	-77.835	(9/2)+	
	86	14.74 h	EC 60%, $\beta^+$ 34%	-79.239	4-	
	86m	48 m	IT 99.31%, $\beta^+$ +EC 0.69%	-79.021	8+	
	87	80.3 h	EC 99.8%, $\beta^+$ 0.2%	-83.007	1/2-	
	87m	13 h	IT 98%, EC 2%, $\beta^+$ 0.75%	-82.626	9/2+	

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J^\pi$	$\sigma_n(h)$
38	Y 88	106.6 d	EC 99+%, $\beta^+$ 0.210%	-84.298	4-	
	89	100%		-87.695	1/2-	1.2 0.0010 <sub>m</sub>
	89m	16.1 s	IT	-86.786	9/2+	
	90	64.1 h	$\beta^-$	-86.481	2-	<6.5 <sub>n</sub>
	90m	3.19 h	IT 99+%, $\beta^-$ 0.0021%	-85.799	7+	
	91	58.5 d	$\beta^-$	-86.350	1/2-	1.4 <sup>m</sup>
	91m	49.7 m	IT	-85.794	9/2+	
	92	3.54 h	$\beta^-$	-84.822	2-	
	92	10.2 h	$\beta^-$	-84.227	1/2-	
	92m	0.82 s	IT	-83.466	9/2+	
	94	18.7 m	$\beta^-$	-82.382	2-	
	95	10.3 m	$\beta^-$	-81.233	(1/2)-	
	96	9.8 s	$\beta^-$			
	96	6.0 s	$\beta^-$	-76.43	(0-)	
	97(g)	3.7 s	$\beta^-$	-76.28	(1/2-)	
	97(m)	1.21 s	$\beta^-$ 99.99%, IT(*) 0.01%	-75.61	(9/2)+	
	98	0.6 s	$\beta^-$	-73.19 s	(1+)	
	98	2.0 s	$\beta^-$	-73.19 s		
	99	1.4 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 1%	-71.50		
	100	0.6 s	$\beta^-$	-67.96 s		
	102	0.9 s?	[ $\beta^-$ ]	-63.36 s		
40	Zr					
	81	~11 m	[ $\beta^+$ ]		0+	
	82	10 m	[ $\beta^+$ +EC]			
	83	~8 m	[ $\beta^+$ ]	-65.4 s		
	83	0.7 m	$\beta^-$	-65.4 s		
	84	5 m	EC+ $\beta^+$	-71.44 s	0+	
	85	7.9 m	$\beta^+$ +EC	-73.16 s		
	86	1.4 M?	[ $\beta^+$ +EC]			
	86m	10.9 s	IT, $\beta^+$ +EC	-72.87 s		
	88	16.5 h	EC	-77.94 s	0+	
	87	1.6 h	$\beta^+$ , EC	-79.43	(9/2+)	
	87m	14 s	IT	-79.09	(1/2-)	
	90	83.4 d	EC	-83.621	0+	
	90	78.4 h	EC 77.7%, $\beta^+$ 22.3%	-84.860	9/2+	
	90m	4.18 m	IT 93.6%, EC 4.7%, $\beta^+$ 1.5%	-84.272	1/2-	
	90	51.58		-86.765	0+	0.03 <sup>m</sup>
	90m	809 ms	IT	-86.446	5-	
	91	11.28		-87.892	5/2+	1.1 <sup>m</sup>
	92	17.18		-88.456	0+	0.2 <sup>m</sup>
	93	1.5x10 <sup>6</sup> y	$\beta^-$	-87.117	5/2+	1 <sup>m</sup>
	94	17.48		-87.264	0+	0.06
	95	64.0 d	$\beta^-$	-85.663	5/2+	
	96	2.808		-85.445	0+	0.020
	97	18.9 h	$\beta^-$	-82.954	1/2+	
	98	31 s	$\beta^-$ , no $\gamma$	-81.383	0+	
	99	2.1 s	$\beta^-$	-77.89	(1/2+)	
	100	2.1 s	$\beta^-$	-76.60	0+	
	101	2.0 s	$\beta^-$	-73.05 s		
	102	2.9 s	$\beta^-$	-72.36 s	0+	
41	Nb					
	86	1.4 m	$\beta^+$	-60.34 s		
	87	2.6 m	$\beta^+$ +EC	-74.43 s	(9/2+)	
	87	3.9 m	$\beta^+$ +EC	-74.43 s	(1/2-)	
	88	7.9 m	$\beta^+$ +EC	-76.42 s	(4-)	
	89	14.3 m	$\beta^+$ +EC	-76.42 s	(8+)	
	90	2.0 h	$\beta^+$ +EC	-80.621	(9/2+)	
	90	66 m	EC 74%, $\beta^+$ 26%	-80.621	(1/2)-	
	90	14.6 h	$\beta^+$ 53%, EC 47%	-82.654	8+	
	90m	18.8 s	IT	-82.529	4-	
	91	long	[EC]	-86.637	9/2+	
	91m	62 s	IT 96.6%, EC 3.4%	-86.532	1/2-	
	92	~2x10 <sup>17</sup> y	EC	-86.448	7+	
	92	3.2x10 <sup>17</sup> y	EC	-86.448		
	93m	10.15 d	EC 98.94%, $\beta^+$ 0.06%	-86.313	2+	
	93	100%		-87.298	9/2+	1.1 <sub>gms</sub>
	93m	13.6 y	IT	-87.179	1/2-	



# TABLE OF NUCLIDES

Z	Symbol	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	A(MeV)	Spin	$\pi_\pi(h)$
41	Nb	94	$2.0 \times 10^6$ y	$\beta^-$	-86.367	6+	$15\frac{h}{2}$
	94m		6.26 m	IT 99.5%, $\beta^-$ 0.5%	-86.326	3+	$0.59\frac{h}{2}$
	96		35.0 d	$\beta^-$	-86.786	9/2+	
	95m		87 h	IT 97.5%, $\beta^-$ 2.5%	-86.552	1/2-	<7 <sup>ns</sup>
	96		23.4 h	$\beta^-$	-85.608	(6)+	
	97		72 m	$\beta^-$	-85.612	9/2+	
	97m		1.0 m	IT	-84.868	1/2-	
	98		2.9 s	$\beta^-$	-83.530	1+	
	98m		51 m	$\beta^-$	-83.446	(5)+	
	99		15.0 s	$\beta^-$	-82.346	(9/2)+	
	99m		2.6 m	$\beta^-$ , IT <sup>ns</sup> (weak)	-81.981	(1/2)-	
	100		1.5 s	$\beta^-$	-79.95		
	100		3.1 s	$\beta^-$			
	101		7.0 s	$\beta^-$	-78.95		
	101		1.0 m <sup>ns</sup>	$\beta^-$			
	102		4.3 s	$\beta^-$	-76.36 s		
	102		1.3 s	$\beta^-$	-76.36 s		
	103		1.5 s	$\beta^-$	-75.41 s		
	104		0.8 s	$\beta^-$	-72.65 s		
	104		4.8 s	$\beta^-$			
	105		2 s	[ $\beta^-$ ]	-70.14 s		
	106		m1 s	$\beta^-$			
42	Mo	98	27 m <sup>ns</sup>	$\beta^+$ +EC	-72.92 s		
	98		8 m	$\beta^+$ +EC	-72.92 s		
	99		5.67 h	EC 75%, $\beta^+$ 25%	-80.167	0+	
	91		15.49 m	$\beta^+$ 94.1%, EC 5.5%	-82.199	9/2+	
	91m		65 s	( $\beta^+$ , EC) 50%, IT 50%	-81.546	1/2-	
	92		14.68 <sup>ns</sup>	$\beta^+$	-86.807	0+	
	93		$3 \times 10^3$ y	EC	-85.803	5/2+	0.3 <sup>ns</sup>
	93m		6.9 h	IT 99.88%, EC 0.12%	-84.578	21/2+	
	94		9.38 <sup>ns</sup>	$\beta^+$	-88.412	0+	
	95		15.88 <sup>ns</sup>	$\beta^+$	-87.712	5/2+	14 <sup>ns</sup>
	96		16.78 <sup>ns</sup>	$\beta^+$	-86.795	0+	1 <sup>ns</sup>
	97		9.68 <sup>ns</sup>	$\beta^+$	-87.544	5/2+	2 <sup>ns</sup>
	98		24.18 <sup>ns</sup>	$\beta^+$	-86.115	0+	0.13
	99		66.02 h	$\beta^-$	-85.970	1/2+	
	100		9.68 <sup>ns</sup>	$\beta^-$	-86.189	0+	0.20
	101		14.6 m	$\beta^-$	-83.516	1/2+	
	102		11.0 m	$\beta^-$	-83.562	0+	
	103		60 s	$\beta^-$	-80.61 s		
	104		1.0 m	$\beta^-$	-81.65 s	0+	
	105		36 s	$\beta^-$	-77.14 s		
	106		9.5 s	$\beta^-$	-76.1 s	0+	
	107		m5 s	$\beta^-$			
	108		1.1 s	$\beta^-$	-70.9 s	0+	
43	Tc	90	50 s	$\beta^+$	-71.3	(1)+	
	91		7.9 s	$\beta^+$	-75.98	(9/2+)	
	91		3.14 m	$\beta^+$ +EC		(1/2)-	
	92		3.3 m	$\beta^+$ +EC		(8)+	
	92		4.4 m	$\beta^+$ +EC	-78.936	9/2+	
	93		2.7 h	EC 67%, $\beta^+$ 13%	-83.610	1/2	
	93m		43 m	IT 80%, EC 20%	-83.217	7+	
	94		293 m	EC 89%, $\beta^+$ 11%	-84.156	(2)+	
	94m		52 m	$\beta^+$ 72%, EC 28%	-86.013	9/2+	
	95		20.0 h	EC	-85.974	1/2-	
	96m		61 d	EC 95.8%, $\beta^+$ 0.31%, IT 3.9%	-85.821	7+	
	96		4.3 d	EC	-85.787	4+	
	96m		52 m	IT 98%, EC 2%, $\beta^+$ m0.01%	-87.224	9/2+	
	97		$2.6 \times 10^6$ y	EC, no $\gamma$	-87.128	1/2-	
	97m		90 d	IT	-86.434	(6)+	
	98		$4.2 \times 10^6$ y	$\beta^-$	-87.326	9/2+	3 <sup>ns</sup>
	99		$2.14 \times 10^5$ y	$\beta^-$	-87.184	1/2-	1 <sup>ns</sup>
	99m		6.02 h	IT 99+%, $\beta^-$ 20x10 <sup>-5%</sup>	-86.019	1+	
	100		15.8 s	$\beta^-$			

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(McV)$	$2n$	$\sigma_n(b)$
43	Tc	101	14.3 m	$\beta^-$	-86.327	9/2+	
		102	5.5 s	$\beta^-$	-84.60 s	1+	
		102m	4.4 m	$\beta^-$ 96%, IT 4%	-84.3 s	(5)	
		103	50 s	$\beta^-$	-84.91		
		104	18.1 m	$\beta^-$	-83.85	(3)	
		105	7.6 m	$\beta^-$	-82.54		
		106	36 s	$\beta^-$	-80.03 s		
		107	21.2 s	$\beta^-$	-79.51 s		
		108	5.1 s	$\beta^-$	-75.8 s		
		109	1.4 s	$\beta^-$			
		110	0.82 s	$\beta^-$	-71 s		
44	Ru	92	3.7 m	$\beta^+$ + EC	-74.7 s	0+	
		93	60 s	$\beta^+$ + EC	-77.31 s	(9/2)+	
		93m	10.6 s	$\beta^+$ + EC 79%, IT 21%	-76.58 s	(1/2)-	
		94	52 m	EC	-82.571	0+	
		95	1.65 h	EC 85%, $\beta^+$ 15%	-83.452	5/2+	
		96	5.58 s		-86.075	0+	0.25
		97	2.88 d	EC	-86.07	5/2+	
		98	1.463 s		-88.226	0+	<0.1
		99	12.78 s		-87.620	5/2+	4
		100	12.68 s		-86.222	0+	6
		101	17.08 s		-87.952	5/2+	5
		102	11.68 s		-89.100	0+	1.3
		103	39.4 d	$\beta^-$	-87.261	5/2+	
		104	16.78 s		-88.099	0+	0.47
		105	4.44 h	$\beta^-$	-85.936	(3/2)+	0.30
		106	367 d	$\beta^-$ , no $\gamma$	-86.333	0+	0.12
		107	4.2 m		-83.71		
		108	4.5 m	$\beta^-$	-83.82	0+	
		109	34 s	$\beta^-$	-80.81 s		
		109	13 s	$\beta^-$	-80.81 s		
		110	16 s	$\beta^-$	-80.3 s	0+	
		111	1.5 s	$\beta^-$			
		111	0.1 m?	$\beta^-$		0+	
		112	0.7 s?	$\beta^-$			
45	Rh	94	25 s	$\beta^+$			
		94	80 s	$\beta^+$			
		95	5.0 m	$\beta^+$ + EC	-78.34	(9/2)+	
		96m	1.96 m	IT 89%, $\beta^+$ + EC 12%	-77.80	(1/2)-	
		96	9.9 m	$\beta^+$ + EC	-79.633	(5+)	
		96m	1.51 m	IT 60%, $\beta^+$ + EC 40%	-79.581	(2+)	
		97	31 m	$\beta^+$ , EC	-82.56	(9/2)+	
		97m	44 m	$(\beta^+, EC)$ 95%, IT 5%	-82.30	(1/2)-	
		97	1 m?	$\beta^+$			
		98(g)	0.7 m	$\beta^+$ , EC	-83.168	(2+)	
		98(m)	3.5 m	$\beta^+$ + EC	-83.162	(5+)	
		99	15.0 d	EC 97.4%, $\beta^+$ 2.6%	-85.517	(1/2)-	
		99m	4.7 h	EC 90%, $\beta^+$ 10%	-85.452	9/2+	
		100	20.6 h	EC 95%, $\beta^+$ 5%	-85.982	1-	
		100m	4.7 m	IT 93%, EC + $\beta^+$ 7%	-85.252	(5+)	
		101	3.3 y	EC	-87.410	1/2-	
		101m	4.34 d	EC 82.8%, IT 7.2%	-87.253	9/2+	
		102	2.9 y	EC		(6+)	
		102m	206 d	EC 62%, $\beta^+$ 14%, $\beta^-$ 19%, IT 5%	-86.777	(2-)	
		103	1008 s		-88.024	1/2-	1.34 s 11 m
		103m	56.1 m	IT	-87.984	7/2+	
		104	42.3 s	$\beta^-$ 80.4%, EC 0.4%	-86.952	1+	40.1 s 9m
		104m	4.34 m	IT 99.87%, $\beta^-$ 0.13%	-86.823	5+	800.1 s 9m
		105	33.4 h	$\beta^-$	-87.855	(7/2)+	1.1 x 10 <sup>4</sup> s 5 x 10 <sup>3</sup> m
		105m	45 s	IT	-87.725	1/2-	
		106	29.8 s	$\beta^-$	-86.372	1+	
		106m	130 m	$\beta^-$	-86.235	4, 5, 6+	
		107	21.7 m	$\beta^-$	-86.06	(5/2)+	
		108	16.8 s	$\beta^-$	-85.02	1+	

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J^\pi$	$\sigma_a(b)$
45	Rh	100	6.0 m	$\beta^-$	-85.09		
		109	60 s	$\beta^-$	-86.11 s	(5/2-, 3/2+)	
		110	3 s	$\beta^-$	-82.8		
		110	26 s	$\beta^-$	-82.93		
		111	11 s	$\{\beta^-\}$	-82.53 s		
		112	4.6 s	$\beta^-$	-80.3 s		
		113	0.9 s	$\{\beta^-\}$			
		114	1.7 $\mu$ s	$\beta^-$			
46	Pd	97	3.3 m	$\beta^+ + EC$	-77.76 s		
		98	16 m	$EC + \beta^+$	-81.27 s	0+	
		98	21.4 m	$\beta^+, EC$	-86.112	(5/2+)	
		100	3.6 d	EC	-85.230	0+	
		101	8.5 h	EC 93.6%, $\beta^+$ 6.4%	-85.426	(5/2)+	
		102	1.08		-87.925	0+	5 <sup>ns</sup>
		103	17.0 d	EC	-87.478	5/2+	
		104	11.08		-89.400	0+	
		105	22.78		-88.422	5/2+	
		106	27.38		-89.913	0+	
		107	6.5 $\times 10^6$ y	$\beta^-$ , no $\gamma$	-88.371	5/2+	0.28 <sub>s</sub>
		107m	21.3 s	IT	-86.156	11/2-	0.013 <sub>m</sub>
		108	26.78		-89.523	0+	
		108	13.43 h	$\beta^-$	-87.606	5/2+	
		108m	4.69 m	IT	-87.417	11/2-	
		110	11.08		-88.335	0+	0.36 <sub>s</sub> 0.02 <sub>m</sub>
		111	22 m	$\beta^-$	-86.03	(5/2+)	
		111m	5.5 h	IT 71%, $\beta^-$ 29%	-85.86	(11/2-)	
		112	21.1 h	$\beta^-$	-86.326	0+	
		113	1.5 m	$\beta^-$ , no $\gamma$	-83.64 s		
		114	2.4 m	$\beta^-$ , no $\gamma$	-83.76 s	0+	
		115	37 s	$\beta^-$			
		116	14 s	$\beta^-$	-80.12 s	0+	
		117	5 s	$\{\beta^-\}$			
		118	3.1 s	$\beta^-$	-76.21 s	0+	
47	Ag	99	1.8 m <sup>a</sup>	$\beta^+ + EC$	-76.51 s		
		100	2.3 m	$\beta^+ + EC$	-77.93		
		100	8 m <sup>a</sup>	$\beta^+ + EC$			
		101	10.6 m	$\beta^+ + EC$	-81.33 s	(3/2+)	
		102	13.0 m	$\beta^+ \approx 60\%$ , EC $\approx 32\%$	-82.33	5+	
		102m	7.7 m	( $\beta^+, EC$ ) 51%, IT 49%	-82.32	2+	
		103	1.10 h	EC $\approx 56\%$ , $\beta^+ \approx 42\%$	-84.60	7/2+	
		103m	5.7 s	IT	-84.67	(1/2)-	
		104	69 m	$\beta^+, EC$	-85.150	5+	
		104m	33 m	( $\beta^+, EC$ ) 67%, IT 33%		2+	
		105	41.3 d	EC 99+%, $\beta^+$ 9 $\times 10^{-6}\%$	-87.075	1/2-	
		105m	7.2 m	IT 99.7%, EC 0.3%	-87.049	(7/2)+	
		106	24.0 m	(EC, $\beta^+$ ) $\approx 99\%$ , $\beta^- \gamma \leq 1\%$	-86.929	1+	
		106m	8.5 d	EC	-86.841	6+	
		107	51.838		-88.404	1/2-	37 <sub>s</sub> 0.5 <sub>m</sub>
		107m	44.3 s	IT	-88.311	7/2+	
		108	2.4 m	$\beta^-$ 97.7%, EC 2.1%, $\beta^+$ 0.24%	-87.602	1+	
		108m	127 y	EC + $\beta^+$ 91%, IT 9%	-87.492	6+	
		109	48.178		-88.722	1/2-	80 <sub>s</sub> 4 <sub>m</sub>
		109m	39.6 s	IT	-88.634	7/2+	
		110	24.4 s	$\beta^-$ 99.7%, EC 0.3%	-87.456	1+	
		110m	252 d	$\beta^-$ 98.5%, IT 1.5%	-87.338	6+	80 <sub>gm</sub>
		111	7.45 d	$\beta^-$	-88.226	1/2-	3 <sup>m</sup>
		111m	65 s	IT 99.7%, $\beta^-$ 0.3%	-88.166	(7/2+)	
		112	3.14 h	$\beta^-$	-86.820	2(-)	

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$Q(\text{MeV})$	$J\pi$	$\sigma_0(b)$
47	Ag	113	1.15 m	$\beta^-$	-86.62		
		113	5.37 h	$\beta^-$	-87.040	1/2(-)	
		114	4.5 s	$\beta^-$	-85.16	1+	
		115	18 s	$\beta^-$			
		115	20 m	$\beta^-$	-84.91	(1/2-)	
		116	2.68 m	$\beta^-$	-82.62 s		
		116m	10.5 s	$\beta^-$ ~98%, IT ~2%	-82.54 s		
		117	1.21 m	$\beta^-$	-82.24		
		117	5.3 s	$\beta^-$	-82.24		
		118	3.7 s	$\beta^-$	-80.21 s		
		118m	2.6 s	$\beta^-$ 59%, IT 41%	-80.08 s		
		119	2.1 s	$\beta^-$	-79.31 s	(7/2+)	
		120	1.2 s	$\beta^-$	-78.0 s	(3+)	
		120m	0.32 s	$\beta^-$ ~63%, IT ~37%	-77.6 s	(6-)	
		121	43 s	$\beta^-$			
		122	1.5 s	$\beta^-$	-70.5 s		
		123	0.39 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$			
48	Cd	100	1.1 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-73.43 s	0+	
		101	1.2 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-75.53 s		
		102	5.5 m	$\text{EC}, \beta^+$	-79.43 s	0+	
		103	7.3 m	$\beta^+, \text{EC}$	-80.60		
		104	56 m	$\text{EC } 99.2\%, \beta^+ 0.6\%$	-83.57	0+	
		105	56.0 m	$\text{EC}, \beta^+$	-84.336	5/2+	
		106	1.258 s		-87.131	0+	1 <sup>m</sup>
		107	6.50 h	$\text{EC } 99.77\%, \beta^+ 0.23\%$	-86.967	5/2+	
		108	0.698 s		-89.251	0+	1.2 <sup>m</sup>
		109	453 d	$\text{EC}$	-86.540	5/2+	700 <sup>m</sup>
		110	12.58 s		-90.349	0+	11 <sup>m</sup> 0.10 <sup>m</sup>
		111	12.68 s		-89.254	1/2+	24 <sup>m</sup>
		111m	48.6 m	IT	-86.658	11/2-	
		112	24.18 s		-90.578	0+	2 <sup>m</sup> 9
		113	12.28 s		-89.050	1/2+	1.96x10 <sup>4</sup>
		113m	9x10 <sup>15</sup> y	$\beta^-, \text{no } \gamma$			
		113m	1.4 y	$\beta^- 99.9\%, \text{IT } 0.1\%$	-86.787	11/2-	
		114	26.78 s		-90.020	0+	0.30 <sup>m</sup> 0.04 <sup>bc</sup>
		115	53.4 h	$\beta^-$	-86.093	1/2+	
		115m	44.8 d	$\beta^-$	-87.920	11/2-	
		116	2.58 s		-86.716	0+	0.05 <sup>m</sup> 0.025 <sup>bc</sup>
48	In	117	2.4 h	$\beta^-$	-86.416	1/2+	
		117m	3.4 h	$\beta^-$	-86.29	11/2-	
		118	50.3 m	$\beta^-, \text{no } \gamma$	-86.707	0+	
		119	2.7 m	$\beta^-$	-84.23	1/2+	
		119m	1.9 m	$\beta^-$	-84.08	11/2-	
		120	50.8 s	$\beta^-$	-83.981	0+	
		121	12.6 s	$\beta^-$	-81.3 s		
		121	4.6 s	$\beta^-$	-81.3 s		
		122	5.8 s	$\beta^-$	-80.0 s	0+	
		124	0.9 s	$\beta^-$	-76.4 s	0+	
		104	1.5 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-75.57 s		
		105	5.1 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-79.34 s		
		106m	55 s <sup>p</sup>	IT <sup>p</sup>			
		106	5.3 s	$\beta^+ + \text{EC}$	-80.586	(3)	
		106	6.3 m	$\beta^+ + \text{EC}$			
		107	32.4 m	$\text{EC } 65\%, \beta^+ 35\%$	-83.50	9/2+	
		107m	50 s	IT	-82.82	1/2-	
		108	40 m	$\text{EC}, \beta^+$	-84.10	3+	
		108	56 m	$\text{EC}, \beta^+$	-84.13	(5,6+)	
		109	4.2 h	$\text{EC } 94\%, \beta^+ 6\%$	-86.324	9/2+	
		109m <sub>1</sub>	1.3 m	IT	-85.874	1/2-	
		109m <sub>2</sub>	0.21 s	IT	-84.41	(19/2+)	
		110	4.9 h	$\text{EC}$		7+	
		110	69 m	$\beta^+, \text{EC}$	-86.409	2+	
		111	2.83 d	$\text{EC}$	-86.405	9/2+	

# TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	J $\pi$	$\sigma_n$ (b)
49	In	111m	7.6 m	IT	-87.869	1/2-	
		112	14.4 m	$\beta^-$ 44%, EC 34%, $\beta^+$ 22%	-88.000	1+	
		112m	20.9 m	IT	-87.845	4+	
		113	4.38		-89.372	9/2+	5 m
		113m	98.5 m	IT	-88.980	1/2-	3 s
		114	71.9 s	$\beta^-$ 98.1%, EC 1.9%, $\beta^+$ 0.004%	-88.576	1+	
		114m	49.51 d	IT 86.7%, EC 3.3%	-88.386	5+	
		116	95.7% 5.1x10 <sup>14</sup> y	$\beta^-$ 40% $\gamma$	89.541	9/2+	91 m 70 ml 41 g
		115m	4.49 h	IT 95%, $\beta^-$ 5%	-89.205	1/2-	
		116	14.10 s	$\beta^-$	-88.253	1+	
		116m <sub>1</sub>	54.1 m	$\beta^-$	-88.128	3+	
		116m <sub>2</sub>	2.16 s	IT	-87.963	8-	
		117	42 m	$\beta^-$	-88.944	9/2+	
		117m	1.93 h	$\beta^-$ 53%, IT 47%	-88.629	1/2-	
		118	5.0 s	$\beta^-$	-87.45	1+	
		118	4.4 m	$\beta^-$	-87.37	(5)+	
		118	8.5 s	IT 98.5%, $\beta^-$ 1.5%	-87.23	(8)-	
		119	2.1 m	$\beta^-$	-87.730	9/2+	
		119m	18.0 m	$\beta^-$ 95%, IT 5%	-87.419	1/2-	
		120	44 s	$\beta^-$	-85.8	(5)+	
		120	3.0 s	$\beta^-$	-85.5	1+	
		121	30.0 s	$\beta^-$	-85.842	9/2+	
		121m	3.8 m	$\beta^-$ 98.8%, IT 1.2%	-85.528	1/2-	
		122	9.2 s	$\beta^-$	-83.4	(1)+	
		122	1.5 s	$\beta^-$	-83.5	(9/2)+	
		123(g)	6.0 s	$\beta^-$	-83.44	(1/2)-	
		123(m)	46 s	$\beta^-$	-83.12	(2)+	
		124	2.4 s	$\beta^-$	-81.10	(9/2)+	
		124	3.2 s	$\beta^-$	-77.90		
		125	12.2 s	$\beta^-$	-77.36		
		126	1.53 s	$\beta^-$	-77.36		
		127	1.3 s	$\beta^-$	-73.12		
		127	3.7 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-70.08 s		
		128	12 s?	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-69.8 s	(9/2+)	
		129	2.5 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-65 s		
		129	0.99 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-76.99 s	0+	
		130	0.56 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-78.40 s	0+	
		130	0.29 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-81.90 s	0+	
		131	0.12 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-82.62 s	7/2+	
		132	0.12 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-85.834	0+	
50	Sn	106	1.9 m	EC+ $\beta^+$	-85.941	7/2+	
		107	2.90 m	$\beta^+$ +EC	-76.99 s	0+	
		108	10.5 m	EC	-78.40 s	0+	
		109	18.0 m	$\beta^+$ , EC	-81.90 s	0+	
		109	1.5 m?	?	-82.62 s	7/2+	
		110	4.1 m	EC	-85.834	0+	
		111	35 m	EC 71%, $\beta^+$ 29%	-85.941	7/2+	
		112	1.018		-88.658	0+	0.4 <sup>n</sup> 0.3 <sup>m</sup>
		113	115.1 d	EC	-88.332	1/2+	
		113m	21 m	IT 91%, EC 9%	-88.253	1/2+	
		114	0.678		-90.560	0+	
		115	0.308		-90.035	1/2+	50 m
		116	14.88		-91.528	0+	0.006 <sup>n</sup> 3 <sup>m</sup>
		117	7.758		-90.399	1/2+	
		117m	14.0 d	IT	-90.084	11/2-	
		118	24.38		-91.654	0+	0.06 <sup>n</sup> 2
		119	0.68		-90.067	11/2-	
		119m	~250 d	IT	-89.877	11/2-	
		120	32.48		-91.102	0+	0.16 <sup>n</sup> 0.001 <sup>m</sup>

# TABLE OF NUCLIDES

	Nuclide			Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$A(\text{MeV})$	$J\pi$	$a_n(h)$
Z	El	A						
50	Sn	121		27.1 n	$\beta^-$ , no $\gamma$	-89.202	3/2+	
		121m		55 y	$\beta^-$	-89.196	(11/2)-	
		122		4.568		-89.946	0+	0.15 m 0.001 g
		123		129 d	$\beta^-$	-87.821	11/2-	
		123m		40.1 m	$\beta^-$	-87.796	(3/2)+	
		124		5.648		-88.240	0+	0.13 m 0.005 g
		126		9.82 d	$\beta^-$	-85.903	11/2-	
		126m		9.5 m	$\beta^-$	-85.876	3/2+	
		128		$\approx 1 \times 10^5$ y	$\beta^-$	-86.024	0+	
		127		2.1 h	$\beta^-$	-83.79	(11/2)-	
		127m		4.1 m	$\beta^-$	-83.70	(3/2)+	
		128		50.3 m	$\beta^-$	-83.44	0+	
		129		2.2 m	$\beta^-$	-80.64	(3/2)+	
		129m		7.5 m	$\beta^-$	-80.60	(11/2)-	
		130		3.7 m	$\beta^-$	-80.38	0+	
		130m		1.7 m	$\beta^-$	-80.38	(7-)	
		131		63 s	$\beta^-$	-77.46 s	(3/2)+	
		132		40 s	$\beta^-$	-76.60	0+	
		133		1.47 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$	-71.5		
		134		1.04 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ $\approx 17\%$		0+	
51	Sb	108		7.0 s	$\beta^-$	-72.40 s	(3+)	
		108m		18.3 s	$\beta^-$ + EC	-76.12 s		
		110		23 s	$\beta^-$ $\approx 92\%$ , EC $\approx 8\%$	-76.75	(3+)	
		111		75 s	$\beta^-$ , EC	-81.47	(5/2)+	
		112		54 s	$\beta^-$ , EC	-81.63	(3+)	
		113		6.7 m	EC, $\beta^+$	-84.443	(5/2)+	
		114		3.5 m	$\beta^+$ , EC	-84.14	(3)+	
		114		8 m	?			
		115		31.8 m	EC 67%, $\beta^+$ 33%	-87.005	5/2+	
		116		16 m	EC 72%, $\beta^+$ 28%	-86.93	3+	
		116m		60.4 m	EC 81%, $\beta^+$ 19%	-86.32	0-	
		117		2.80 h	EC 97.5%, $\beta^+$ 2.5%	-88.654	5/2+	
		118		3.5 m	EC, $\beta^+$	-87.967	1+	
		118		0.87 s	?			
		118m		5.00 h	EC 99.84%, $\beta^+$ 0.16%	-87.747	8-	
		119		36.0 h	EC	-88.483	5/2+	
		120		15.8 m	EC 56%, $\beta^+$ 44%	-86.421	1+	
		120		5.76 d	EE		8-	
		121		57.38		-89.588	5/2+	6.1 g 0.06 m
		122		2.68 d	$\beta^-$ 97.0%, EC 3.0%, $\beta^-$ 0.0063%	-88.323	2-	
		122m		4.2 m	IT	-88.160	(8-)	
		123		42.78		-89.218	7/2+	4.0 g 0.04 ml 7 m
		124		60.30 d	$\beta^-$	-87.613	3-	
		124m <sub>1</sub>		93 s	IT 60%, $\beta^-$ 20%	-87.603	(5)+	
		124m <sub>2</sub>		20.2 m	IT	-87.578		
		125		2.7 y	$\beta^-$	-86.252	7/2+	
		126		12.4 d	$\beta^-$	-86.402	(6-)	
		126m		19.0 m	$\beta^-$ 88%, IT 14%	-86.384	(5)+	
		127		3.9 d	$\beta^-$	-86.704	7/2+	
		128(a)		8.1 h	$\beta^-$	-84.75	8-	
		128(m)		10.0 m	$\beta^-$ 96.4%, IT 3.6%	-84.73	5+	
		129		4.4 s	$\beta^-$	-84.630	7/2+	
		130		40 m	$\beta^-$	-82.38	(6-)	
		130		6.5 m	$\beta^-$		(4,5)+	
		131		23.03 m	$\beta^-$	-82.10 s	(7/2)+	
		132		2.8 m	$\beta^-$	-79.68	(4+)	
		133		4.2 m	$\beta^-$		(8-)	
		133		2.7 m	$\beta^-$	-78.98		
		134		10.4 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.09%	-73.87 s		
		134		0.8 s	$\beta^-$ , no $\gamma$	-73.87 s		
		136		1.70 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 20%	-70.44 s	(7/2)+	
		136		0.82 s	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 32%			
52	Ta	107		2.1 s	$\alpha$			

TABLE OF NUCLIDES

Z	E	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$M(\text{MeV})$	$J^\pi$	$\sigma_n(\text{b})$
58	Fe	100	5.3 s	$\alpha, (\beta^+ + \text{EC}), (\beta^- + \text{EC})_p$	-85.32 s	0+	
		100	4.2 s	$(\beta^+ + \text{EC}), (\beta^- + \text{EC})_{p,n}$	-87.47 s		
		111	19 s	$\beta^+ + \text{EC}, (\beta^- + \text{EC})_p$	-74.10 s		
		113	2.0 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-70.96		
		114	17 m	$\text{EC} + \beta^+$	-81.46 s	0+	
		116	6.0 m	$\beta^+ \approx 75\%, \text{EC} \approx 25\%$	-82.58	(7/2+)	
		116	7.5 m	$\beta^+ + \text{EC}$		(1/2+)	
		118	2.50 h	$\text{EC}, \beta^+$	-85.37	0+	
		117	62 m	$\text{EC } 70\%, \beta^+ 30\%$	-85.164	1/2+	
		118	6.00 d	$\text{EC}, n, \gamma$	87.671	0+	
		119	16.05 h	$\text{EC } 97.2\%, \beta^+ 2.8\%$	-87.109	1/2+	
		119m	4.68 d	$\text{EC}$	-86.89	11/2-	
		120	0.091 s		-89.404	0+	2.0 <sup>18</sup> <sub>9</sub>
		121	16.8 d	$\text{EC}$	-88.486	1/2+	0.3 <sup>18</sup> <sub>m</sub>
		121m	154 d	$\text{IT } 90\%, \text{EC } 10\%, \beta^+ 0.002\%$	-88.192	11/2-	
		122	2.58 s		-90.304	0+	3 <sup>18</sup> <sub>9m</sub>
		123	0.882 s		-89.166	1/2+	400 <sup>18</sup>
		123m	119.7 d	$\text{IT}$	-88.918	11/2-	
		124	4.68 s		-90.518	0+	7 <sup>18</sup> <sub>9</sub>
		125	2.08 s		-89.019	1/2+	0.05 <sup>18</sup> <sub>m</sub>
		125m	56 d	$\text{IT}$	-88.874	11/2-	1.6 <sup>18</sup>
		126	18.78 s		-90.066	0+	0.9 <sup>18</sup> <sub>9</sub>
		127	9.4 h	$\beta^-$	-88.285	3/2+	0.13 <sup>18</sup> <sub>m</sub>
		127m	109 d	$\text{IT } 97.6\%, \beta^- 2.4\%$	-88.197	11/2-	
		128	31.78 s		-88.992	0+	0.20 <sub>9</sub>
			$1.5 \times 10^{10}$ y	$\beta^- \beta^-$	-86.901	3/2+	0.016 <sub>m</sub>
		129	69 m	$\beta^-$	-87.007	3/2+	
		129m	33.5 d	$\text{IT } 63\%, \beta^- 37\%$	-86.901	11/2-	
		130	34.58 s		-87.346	0+	0.2 <sup>18</sup> <sub>9</sub>
			$2 \times 10^{21}$ y	$\beta^- \beta^-$			0.03 <sup>18</sup> <sub>m</sub>
		131	25.0 m	$\beta^-$	-85.201	3/2+	
		131m	30 h	$\beta^- 78\%, \text{IT } 22\%$	-85.019	11/2-	
		132	78 h	$\beta^-$	-85.213	0+	
		133	12.4 m	$\beta^-$	-82.93	(3/2+)	
		133m	55.4 m	$\beta^- 83\%, \text{IT } 17\%$	-82.80	(11/2-)	
		134	42 m	$\beta^-$	-82.67 s	0+	
		135	19.2 s	$\beta^-$	-77.60	0+	
		136	17.5 s	$\beta^-, \beta^-, n 0.7\%$	-74.83 s	0+	
		137	4 s	$\beta^-, \beta^-, n 2.5\%$			
		138	1.4 s	$\beta^-, \beta^-, n 85\%$			
53	I	115	1.3 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-76.78 s	0+	
		116	2.9 s	$\beta^+ + \text{EC}$	-77.61	1+	
		117	2.2 m	$\text{EC } 54\%, \beta^+ 46\%$	-80.85		
		118	14.3 m	$\beta^+ 54\%, \text{EC } 46\%$	-80.60	(2-)	
		118m	8.5 m	$\beta^+, \text{EC}, \text{IT}$	-83.82		
		119	19.3 m	$\beta^+ 51\%, \text{EC } 49\%$	-83.780	2-	
		120	1.35 h	$\text{EC } 54\%, \beta^+ 46\%$	-82.86		
		120m	53 m	$\beta^+, \text{EC}$	-86.12	5/2+	
		121	2.12 h	$\text{EC } 94\%, \beta^+ 6\%$	-86.16	1+	
		122	3.6 m	$\beta^+ 77\%, \text{EC } 23\%$	-87.97	5/2+	
		123	13.0 h	$\text{EC}$	-87.361	2-	
		124	4.2 d	$\text{EC } 75\%, \beta^+ 25\%$	-86.841	5/2+	900 <sup>m</sup>
		125	60.2 d	$\text{EC}$	-87.911	2-	$6 \times 10^{13}$ <sub>m</sub>
		126	13.0 d	$\text{EC } 53\%, \beta^+ 1.0\%, \beta^- 46\%$	-86.980	5/2+	6.1
52	Te	127	1008 s		-87.734	1+	
		128	24.99 m	$\beta^- 94\%, \text{EC } 6\%, \beta^+ 0.003\%$	-86.505	7/2+	10 <sub>9</sub>
		129	$1.6 \times 10^7$ y	$\beta^-$			

# TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(Mc^2)$	$J\pi$	$\sigma_a(b)$
53 I	I	130	12.36 h	$\beta^-$	-86.881	5+	0.7 <sub>cm</sub>
		130m	9.2 m	IT 63% $\beta^-$ 17%	-86.849	2+	
		131	8.040 d	$\beta^-$	-87.451	7/2+	
		132	2.28 h	$\beta^-$	-85.706	4+	
		132m	83 m	IT 86% $\beta^-$ 14%	-86.559	(8-)	
		133	20.9 h	$\beta^-$	-85.903	7/2+	
		133m	9 s	IT	-84.266	(19/2-)	
		134	52.6 m	$\beta^-$	-83.97	(4)+	
		134m	3.5 m	IT 98% $\beta^-$ 2%	-83.65	(8-)	
		135	6.61 h	$\beta^-$	-83.796	7/2+	
		136	46 s	$\beta^-$	-79.43	(3,6-)	
		136	83 s	$\beta^-$	-76.72	(2-)	
		137	24.5 s	$\beta^-$ $\beta^-$ n 6%	-71.85 s	(2,3-)	
		138	6.5 s	$\beta^-$ $\beta^-$ n 5%	-68.87 s		
		139	2.3 s	$\beta^-$ $\beta^-$ n 10%	-73.27		
		140	0.8 s	$\beta^-$ $\beta^-$ n 14%	-74.48 s		
		141	0.5 s	$[\beta^-]$ $\beta^-$ n ~60%	-77.30 s		
		142	2.8 s	$[\beta^-+EC]$ $(\beta^-+EC)$ p	-78.63		
		143	18 s	$\beta^-$ $\beta^-$ $\beta^-$ $(\beta^-+EC)$ p 0.3%	-81.84		
		144	57 s	$\beta^-+EC$	-82.33		
54 Xe	Xe	113	2.8 s	EC 65% $\beta^-$ 35%	-85.16 s		100 <sub>g</sub> 20 <sub>m</sub>
		113	18 s	$(EC+\beta^-)$ p 0.003%	-87.45	0+	
		114	57 s	EC 99.7% $\beta^-$ 0.3%	-87.11	(1/2)+	
		115	17 h	IT	-86.06	(9/2)-	
		116	57 s	IT	-86.162	0+	
		117	61 s	EC 86% $\beta^-$ 14%	-86.316	(1/2)+	
		118	6 m	EC 62% $\beta^-$ 38%	-86.019	(9/2)-	
		119	6 m	EC 97% $\beta^-$ 3%	-86.061	0+	
		120	40 m	EC 92% $\beta^-$ 8%	-86.206	0+	
		121	39 m	EC	-87.662	3/2+	
		122	20.1 h	EC	-87.429	11/2-	
		123	2.06 h	EC 87% $\beta^-$ 13%	-86.125	0+	
		124	0.0968 s		-86.160	(7-)	
		125	17 h	EC 99.7% $\beta^-$ 0.3%	-86.506	3/2+	
		126m	57 s	IT	-85.979	11/2-	
		127	0.0908 s		-86.425	0+	
		127	36.41 d	EC	-82.215	(7/2)-	
		127m	68 s	IT	-80.15	0+	
		128	1.828 s		-75.75	(7/2-)	
55 Cs	Cs	129	1.028 s		-73.18	0+	0.16
		130	26.48 s		-68.05	0+	
		130m	8.89 d	IT	-86.125	0+	
		131	4.18 s		-86.160	(7-)	
		131	21.28 s		-86.506	3/2+	
		131m	11.77 d	IT	-85.979	11/2-	
		132	26.88 s		-86.425	0+	
		133	5.25 d	$\beta^-$	-82.215	(7/2)-	
		133m	2.19 d	IT	-80.15	0+	
		134	10.48 s		-75.75	(7/2-)	
		134m	0.29 s	IT	-73.18	0+	
		135	9.10 h	$\beta^-$	-68.05	0+	
		136m	15.6 m	IT 99+% $\beta^-$ 0.004%	-86.125	0+	
		136	0.88 s		-86.160	(7-)	
		137	3.82 m	$\beta^-$	-86.506	3/2+	
		138	14.1 m	$\beta^-$	-85.979	11/2-	
		139	39.7 s	$\beta^-$	-86.425	0+	
		140	14 s	$\beta^-$	-82.215	(7/2)-	
		141	1.73 s	$\beta^-$ $\beta^-$ n 0.05%	-80.15	0+	
		142	1.2 s	$\beta^-$ $\beta^-$ n 0.41%	-75.75	(7/2-)	
		143	0.30 s	$\beta^-$	-73.18	0+	
		143	0.96 s	$\beta^-$	-68.05	0+	
		144	1.2 s	$\beta^-$		0+	
		145	0.9 s	$\beta^-$			
		146	3.9 s	$\beta^-+EC_n(\beta^-+EC)$ p 0.3%	-62.63 s		



# TABLE OF NUCLIDES

Z	Element	Nucleide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$A(MeV)$	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
55	Cs	117	8 s	$\beta^+ + EC$	-66.85 s		
		118	16 s	$\beta^+ + EC$ $(\beta^+ + EC)_p$ 0.04%, $(\beta^+ + EC)_n$ 0.0024%	67.89 s		
		119	38 s	$\beta^+ + EC$	72.53 s		
		120	60 s	$\beta^+ + EC$ $(\beta^+ + EC)_p$ $2.0 \times 10^{-5}\%$ , $(\beta^+ + EC)_n$ $7 \times 10^{-6}\%$	-73.4		
		121	126 s	$\beta^+ + EC$	-77.13 s		
		122	4.5 m	$\beta^+ + EC$			
		122	21 s	$\beta^+ + EC$	78.01 s	(2,3+)	
		122	0.4 s	$\gamma$			
		123	5.9 m	$\beta^+ + EC$	-81.19	(1/2+)	
		123m	1.6 s	IT			
		124	31 s	$\beta^+ \approx 92\%, EC \approx 8\%$	-81.53	(1+)	
		125	45 m	EC 61%, $\beta^+$ 39%	-84.04	1/2+	
		126	1.64 m	$\beta^+$ 82%, EC 18%	-84.33	1+	
		127	6.2 h	EC 96.5%, $\beta^+$ 3.5%	-86.726	1/2+	
		128	3.6 m	$\beta^+$ 61%, EC 39%	-85.935	1+	
		129	32.3 h	EC 99+%, $\beta^+$ 0.0030%	-87.493	1/2+	
		130	29.9 m	(EC, $\beta^+$ ) 98.4%, $\beta^-$ 1.6%	-86.863	1+	
		131	9.688 d	EC, no $\gamma$	-88.066	5/2+	
		132	6.47 d	EC 96.5%, $\beta^+$ 1.5%, $\beta^-$ 2.0%	-87.175	2(-)	
		133	1022 <sup>a</sup>		-88.089	7/2+	27 <sup>a</sup> 7.5 <sup>m</sup>
		134	2.062 y	$\beta^-$ 99+%, EC $3 \times 10^{-4}\%$	-86.909	4+	140 <sup>a</sup> 9 <sup>m</sup>
		134m	2.90 n	IT	-86.770	8-	
		136	$3 \times 10^6$ y	$\beta^-$ , no $\gamma$	-87.665	7/2+	
		136m	53 m	IT	-86.038	(19/2-)	
		136	13.1 d	$\beta^-$	-86.358	5+	
		136m	19 s	IT			
		137	30.17 y	$\beta^-$	-86.560	7/2+	0.11 <sup>18</sup> 9 <sup>m</sup>
		138	32.2 m	$\beta^-$	-82.98	3-	
		138m	2.9 m	IT 75%, $\beta^-$ 25%	-82.90	(6-)	
		139	9.5 m	$\beta^-$	-80.63	(7/2+)	
		140	65 s	$\beta^-$	-77.24	1,2-	
		141	24.9 s	$\beta^-, \beta^- n$ 0.05%	-75.00		
		142	1.69 s	$\beta^-, \beta^- n$ 0.28%	-70.95		
		143	1.70 s	$\beta^-, \beta^- n$ 1.7%	-69.36 s		
		144	1.00 s	$\beta^-, \beta^- n$ 3.0%	-63.93 s		
		145	0.50 s	$\beta^-, \beta^- n$ 12%	-61.72 s		
		146	0.34 s	$\beta^-, \beta^- n$ 14%			
56	Ba	117	1.9 s	$(\beta^+ + EC), (\beta^+ + EC)_p$	-64.53 s		
		119	5.3 s	$(\beta^+ + EC)_p$	-68.8 s	0+	
		120	32 s	$\beta^+ + EC$			
		121	30 s	$\beta^+ + EC$ $(\beta^+ + EC)_p$ 0.02%	-70.50 s		
		122	2.0 m	$\beta^+ + EC$	-74.26 s	0+	
		122	$\approx 4$ s	$(\beta^+ + EC)$			
		123	2.7 m	$\beta^+ + \beta^+$	-75.69 s		
		124	11 m	EC + $\beta^+$	-78.79 s	0+	
		125	3.5 m	$\beta^+, EC$	-79.53		
		126	8 m	$\beta^+ + EC$			
		128	100 m	EC + $\beta^+$	-82.56 s	0+	
		127	13 m	$\beta^+ \approx 51\%, EC \approx 49\%$	-82.78	(1/2+)	
		127	18 m	$\beta^+ + EC$			
		128	2.43 d	EC	-85.462	0+	
		129	2.2 h	EC, $\beta^+$	-85.946	1/2+	
		129m	2.1 h	EC + $\beta^+$	-84.769	(11/2)-	
		130	0.106 <sup>a</sup>		-87.303	0+	8 <sup>m</sup> 2.5 <sup>a</sup>
		131	12.0 d	EC	-86.726	1/2+	
		131m	14.6 m	IT	-86.538	9/2-	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(M-V)$	$J\pi$	$\sigma_n(h)$
56	Fe	132		0.101%		-89.453	0+	$7^{10}_6$ 0.6 $^{10}_6$
		133		10.7 y	EC	-87.569	1/2+	
		133m		30.9 h	IT 99+%, EC 0.011%	-87.281	11/2-	
		134		2.42%		-88.960	0+	0.16 $^{10}_6$ 0.2 $^{10}_6$
		135		6.58%		-87.870	3/2+	$5^{10}_6$ 0.014 $^{10}_6$
		136m		26.7 h	IT	-87.602	11/2-	
		136		7.63%		-88.906	0+	0.011 $^{10}_6$ 8.4 $^{10}_6$
		136m		0.31 s	IT	-86.876	7-	
		137		71.2%		-87.733	3/2+	5.1 $^{10}_6$
		137m		2.551 m	IT	-87.071	11/2-	
		138		71.7%		-88.273	0+	0.4 $^{10}_6$
		139		82.9 m	$\beta^-$	-84.925	(7/2)-	6 $^{10}_6$
		140		12.79 d	$\beta^-$	-83.285	0+	1.6
		141		18.2 m	$\beta^-$	-79.98		
		142		10.6 m	$\beta^-$	-77.82	0+	
		143		13.5 s	$\beta^-$	-74.01 s		
		144		11.9 s	$\beta^-$	-72.03 s	0+	
		145		5 s	$\beta^-$	-67.82 s		
		146		1.7 s	$\beta^-$	-65.56 s	0+	
		146		0.5 s	$\beta^-$		0+	
57	La	135		<1 m?	?			
		136		1.0 m	$\beta^+$ +EC			
		137		3.8 m	$\beta^+$ +EC	-77.70 s		
		138		4.6 m	$\beta^+$ +EC	-78.68 s		
		139		1.0 m	$\beta^+$ +EC	-81.05 s		
		139m		0.56 s	IT	-80.88 s	(3/2+) (11/2-)	
		140		6.7 m	$\beta^+$ , EC	-81.60 s	(3+)	
		141		61 m	EC 76%, $\beta^+$ 24%	-83.77	3/2+	
		142		4.8 h	$\beta^+$ , EC	-83.74	2-	
		142m		24.3 m	IT 76%, EC+ $\beta^+$ 24%	-83.55	6-	
		143		3.91 h	EC, $\beta^+$	-85.57 s	5/2+	
		144		6.67 m	$\beta^+$ 62%, EC 38%	-85.268	1+	
		145		19.4 h	EC 99+%, $\beta^+$ 0.009%	-86.670	5/2+	
		146		9.87 m	EC 64%, $\beta^+$ 36%	-86.04	1+	
		147		6 $\times 10^4$ y	EC, no $\gamma$	-87.13 s	7/2+	
		148		0.000007	EC 68%, $\beta^+$ 32%	-86.524	5+	57
		148		1.1 $\times 10^{11}$ y				
		149		59.917%		-87.231	7/2+	9.2
		149		40.3 h	$\beta^-$	-84.320	3-	2.7 $^{10}_6$
		141		3.90 h	$\beta^-$	-83.008		
		142		83 m	$\beta^-$	-80.018	2-	
		143		14.0 m	$\beta^-$	-78.31		
		144		40 s	$\beta^-$	-74.93 s		
		145		30 s	$\beta^-$	-72.92 s		
		146		11 s	$\beta^-$	-69.46 s		
		148		1.3 s	$\beta^-$	-63.99 s		
58	Ce	128		46 m	[EC+ $\beta^+$ ]		0+	
		129		3.5 m	$\beta^+$ +EC			
		130		25 m	EC+ $\beta^+$		0+	
		131		5 m	EC+ $\beta^+$	-79.47 s		
		131		10 m	EC 99%, $\beta^+$ 11%	-79.47 s		
		132		3.5 h	EC	-82.34 s	0+	
		133		87 m	EC+ $\beta^+$	-82.17 s	1/2(+)	
		135		5.4 s	EC, $\beta^+$	-82.17 s	9/2-	
		136		76 h	EC	-84.77 s	0+	
		136		17.6 h	EC 99%, $\beta^+$ 1%	-84.55	1/2(+)	
		136m		20 s	IT	-84.10	(11/2-)	
		136		0.792%		-86.50	0+	$6^{10}_6$ 1.0 $^{10}_6$
		137		9.0 h	EC 99+%, $\beta^+$ 0.014%	-85.91 s	3/2+	

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$M(\text{MeV})$	$J\pi$	$\sigma_n(b)$
58	Ce 137m	34.4 h	IT 99.2%, EC 0.8%	-85.66 s	11/2-	
	138	0.25-08		-87.565	0+	1.0 <sup>2</sup> <sub>s</sub>
	139	137.2 d	EC	-86.966	3/2+	0.015 <sup>1</sup> <sub>m</sub>
	139m	56 s	IT	-86.212	11/2-	
	140	085.58		-88.081	0+	0.56 <sup>2</sup> <sub>s</sub>
	141	32.5 d	$\beta^-$	-85.438	7/2-	29 <sup>2</sup> <sub>m</sub>
	142	11.18		-84.535	0+	0.95
	143	33.0 h	$\beta^-$	-81.610	5/2-	6 <sup>2</sup> <sub>m</sub>
	144	264 d	$\beta^-$	-80.431	0+	10
	145	3.0 m	$\beta^-$	-77.12		
	146	14 m	$\beta^-$	-75.76	0+	
	147	56 s	$\beta^-$	-72.24 s		
	148	48 s	$\beta^-$	-70.81 s	0+	
	149	5.0 s	$\beta^-$	-67.47 s		
	150	4 s	$\beta^-$	-65.3 s	0+	
	151	1.0 s	$\beta^-$	-62.68 s		
59	Pr	121	$[\beta^+ + \text{EC}]_1, (\beta^+ + \text{EC})_2$			
	122	24 s	$\beta^+ + \text{EC}$			
	123	28 s	$\beta^+ + \text{EC}$			
	124	1.6 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-75.34 s		
	125	6.5 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-77.97 s	5/2(+)	
	126	17 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-78.47 s	2+	
	127	11 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-78.47 s		
	128	25 m	EC $\approx 75\%$ , $\beta^+ \approx 25\%$	-80.99	5/2(+)	
	129	13.1 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-81.40	2+	
	130	1.26 h	EC 75%, $\beta^+ 25\%$	-83.21 s	5/2+	
	131	1.4 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-83.128	1+	
	132m	2.1 h	EC 77%, $\beta^+ 23\%$	-82.785	7-	
	133	4.4 h	EC 92%, $\beta^+ 8\%$	-84.854	5/2+	
	134	46 m	$\beta^-$			
	135	3.38 m	EC 51%, $\beta^+ 49\%$	-84.693	1+	
	141	1028		-86.018	5/2+	8 <sub>s</sub> 3.9 <sub>m</sub>
	142	19.2 h	$\beta^- 99+\%, \text{EC } 0.016\%$	-83.790	2-	20 <sup>2</sup> <sub>s</sub>
	142m	14.6 m	IT	-83.708	5-	
	143	1.6 m	$\beta^-$			
	144	13.58 d	$\beta^-$	-83.065	7/2+	90 <sup>2</sup> <sub>m</sub>
	145	17.3 m	$\beta^-$	-80.750	0-	
	146m	7.2 m	IT 99.96%, $\beta^- 0.04\%$	-80.691	3-	
	147	5.06 h	$\beta^-$	-79.625	(7/2+)	
	148	24.0 m	$\beta^-$	-76.84	(1,2-)	
	149	13 m	$\beta^-$	-75.44		
	150	2.30 m	$\beta^-$	-72.61	(3)	
	151	2.3 m	$\beta^-$	-71.37	(5/2+)	
	152	6.2 s	$\beta^-$	-68.0		
	153	30 s	$\beta^-$			
	154	4 s	$\beta^-$	-67.44 s		
60	Nd	120	$[\beta^+ + \text{EC}]_1, (\beta^+ + \text{EC})_2$			
	121	6 s	$\beta^+ + \text{EC}$			
	122	20 s	$\beta^+ + \text{EC}$		0+	
	123	1.8 m	$\beta^+ + \text{EC}$		0+	
	124	1.2 m	$\beta^+ + \text{EC}$			
	125	8 m	EC + $\beta^+$		0+	
	126	12 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-76.29 s	9/2(-)	
	127	5.5 m	$[\beta^+ + \text{EC}]$	-76.29 s		
	128	50.6 m	EC 94%, $\beta^+ 6\%$	-79.19	0+	
	129	36 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-79.41 s	1/2+	
	130m	1.6 s	IT	-78.69 s	11/2-	
	131	22 m	?			
	132	5.1 h	?	-82.03 s	0+	
	133	30 m	EC 74.4%, $\beta^+ 25.6\%$	-82.05	3/2+	
	134m	5.5 h	IT 12%	-81.82	11/2-	
	140	3.37 d	EC, $\alpha$ ?	-84.22	0+	
	141	2.5 h	EC 97.3%, $\beta^+ 2.7\%$	-84.203	3/2+	
	141m	61 s	IT 99.97%, EC + $\beta^+ 0.03\%$	-83.446	11/2-	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$A(MeV)$	$J\pi$	$\sigma_n(b)$
60	Nd	142	27.2%		-85.949	0+	19 <sup>m</sup>
		143	12.2%		-84.000	7/2-	320
		144	23.1%		-83.746	0+	4 <sup>m</sup>
		145	2.1 $\times 10^{15}$ y	$\alpha$	-81.430	7/2-	41
		146	6.3%		-80.923	0+	1.3
		147	11.0 d	$\beta^-$	-78.144	5/2-	440 <sup>m</sup>
		148	5.7%		-77.407	0+	
		149	1.73 h	$\beta^-$	-74.374	5/2-	
		150	1.3%		-73.682	0+	1.2
		151	12.4 m	$\beta^-$	-70.945	(3/2+)	
		152	11.4 m	$\beta^-$	-70.146	0+	
		154	40 s	$\beta^-$		0+	
61	Pm	132	4 s	$\beta^+ + EC$			
		133	12 s	$\beta^+ + EC$			
		134	24 s	$\beta^+ + EC$			
		135	0.9 m	$\beta^+ + EC$		(11/2-)	
		136	107 s	$\beta^+ + EC$	-71.36 s	(5+)	
		137	2.4 m	$\beta^+ + EC$	-74.21 s	(11/2-)	
		138	3.5 m	$\beta^+ + EC$	-75.03 s	(3+)	
		139	4.15 m	$\beta^+ + EC$	-77.60	(5/2)+	
		140	9.2 s	$\beta^+ + EC$	-78.18	1+	
		140m	5.9 m	EC 56%, $\beta^+$ 42%	-77.78	(7-)	
		141	20.9 m	$\beta^+$ 57%, EC 43%	-80.47	5/2+	
		142	40.5 s	$\beta^+$ 68%, EC 31%	-81.06	1+	
		143	265 d	EC	-82.959	5/2+	
		144	349 d	EC	-81.416	5-	
		145	17.7 y	EC 99+%, $\alpha$ 2.6 $\times 10^{-7}$ %	-81.270	5/2+	
		146	5.5 y	EC 63%, $\beta^+$ 37%	-79.442	3-	8 $\times 10^{13}$
		147	2.6234 y	$\beta^-$	-79.040	7/2+	97 <sup>d</sup> 85 <sup>m</sup>
		148	5.37 d	$\beta^-$	-76.870	1-	<3 $\times 10^{13}$ m
		148m	41.3 d	$\beta^-$ 95%, IT 5%	-76.733	6-	1.06 $\times 10^4$
		149	53.1 h	$\beta^-$	-76.063	7/2+	1.4 $\times 10^{13}$ m
		150	2.68 h	$\beta^-$	-73.55	(1-)	
		151	26.4 h	$\beta^-$	-73.386	5/2+	<700 <sup>m</sup>
		152	4.1 m	$\beta^-$	-71.29	(1+)	
		152	7.5 m	$\beta^-$		(4)	
		152	15 m	$\beta^-$		(26)	
		153	5.4 m	$\beta^-$	-70.76	(5/2-)	
		154	1.7 m	$\beta^-$	-68.45	(0,1)	
		154	2.7 m	$\beta^-$		(3,4)	
62	Sm	133	32.0 s	$\beta^+ + EC, (\beta^+ + EC)p$			
		134	12 s	$\beta^+ + EC$		0+	
		135	10 s	$\beta^+ + EC, (\beta^+ + EC)p$			
		137	44 s	$\beta^+ + EC$			
		138	3.0 m	$\beta^+ + EC$		0+	
		139	2.5 m	$\beta^+ + EC$	-72.40		
		139m	10 s	IT 93.7%, $\beta^+ + EC$ 6.3%	-71.94	(11/2)-	
		140	14.8 m	EC, $\beta^+$	-75.48 s	0+	
		141	10.2 m	EC 53%, $\beta^+$ 47%	-75.91	1/2+	
		141m	22.5 m	( $\beta^+, EC$ ) 99.68%, IT 0.31%	-75.73	11/2-	
		142	72.49 m	EC 90%, $\beta^+$ 10%	-78.978	0+	
		143	8.83 m	EC 54%, $\beta^+$ 46%	-79.511	3/2+	
		143m	66 s	IT 99.80%, $\beta^+ + EC$ 0.20%	-78.757	11/2-	
		144	1.1%		-81.964	0+	0.7 <sup>m</sup>
		145	340 d	EC	-80.656	7/2-	110 <sup>m</sup>
		146	<2 $\times 10^{-12}$ y 1.03 $\times 10^{15}$ y	$\alpha$	-80.984	0+	
		147	1.06 $\times 10^{11}$ y	$\alpha$	-79.265	7/2-	60
		148	1.1%		-79.335	0+	4.7
		149	1.1%		-77.135	7/2-	4.2 $\times 10^4$
		150	7.4%		-77.049	0+	104

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
62 Sm	161	90 y	$\beta^-$	-74.574	5/2-	$1.5 \times 10^{-4}$ m
	162	26.43		-74.761	0+	204
	163	46.0 h	$\beta^-$	-72.557	3/2+	
	164	22.63		72.454	0+	5
	166	22.4 m	$\beta^-$	-70.196	3/2-	
	167	9.4 h	$\beta^-$	-69.368	0+	
	167	8.0 m	$\beta^-$	-66.86		
	168	1.5 s	$\beta^-$			
	169	35 s	$\beta^-$			
	170	22 s	$\beta^- + EC$			
63 Eu	140	1.3 s	$\beta^-$			
	140	420 s	$\beta^- + EC$			
	141	40 s	$\beta^-$	-69.88	(5/2+)	
	141m	3.3 s	$\beta^- + EC$ 67%, IT 33%	-69.78	(11/2-)	
	142	2.4 s	$\beta^-$	-71.48	1+	
	142	1.22 m	$\beta^-$	-71.48 s	(7-)	
	143	2.61 m	$\beta^- \approx 72\%, EC \approx 28\%$	-74.41	(5/2)+	
	144	10.2 s	$\beta^- \approx 90\%, EC \approx 10\%$	-75.636	1+	
	145	5.93 d	EC 98%, $\beta^-$ 2%	-77.936	5/2+	
	146	4.62 d	EC 96.1%, $\beta^-$ 3.9%	-77.111	4-	
	146	38 h				
	147	22 d	EC 99.5%, $\beta^-$ 0.5%, $\alpha$ $0.002\%$	-77.535	5/2+	
	148	54 d	EC 99.8%, $\beta^-$ 0.2%, $\alpha$ $9 \times 10^{-7}\%$	-76.235	5-	
	149	93.1 d	EC	-76.439	5/2+	
	150	36 y	EC		(4,5-)	
	160	12.6 h	$\beta^-$ 89%, EC 10.6%, $\beta^+$ $\approx 0.6\%$	-74.756	0(-)	
	161	47.22		-74.650	5/2+	$5.8 \times 10^3$ g $3.2 \times 10^2$ m 4 m
	162	13 y	EC 73.0%, $\beta^-$ 0.019%, $\beta^+$ 27.0%	-72.88	3-	
	162m1	9.3 h	$\beta^-$ 76%, EC 24%, $\beta^+$ 0.011%	-72.836	0-	$< 1$ m
	162m2	96 m	IT	-72.736	8-	
	163	52.78		-73.363	5/2+	300 g
	164	8.5 y	$\beta^-$ 99.98%, EC 0.02%	-71.726	3-	
	164m	46 m	IT	-71.57	(8-)	
	165	4.9 y	$\beta^-$	-71.825	5/2+	$4.0 \times 10^3$
	166	15 d	$\beta^-$	-70.083	0+	
	167	15.13 h	$\beta^-$	-69.465	(5/2+)	
	168	45.9 m	$\beta^-$	-67.24	(1-)	
	169	18.1 m	$\beta^-$	-65.93	(5/2+)	
	170	0.8 m	$\beta^-$	-63.54 s	(0-)	
	180	42.5 m	$\beta^-$			
64 Gd	143	1.83 m	$\beta^- + EC$	-68.51 s	(11/2, 13/2-)	
	143	39 m	$\beta^-$			
	144	4.5 m	$\beta^- + EC$	-71.94 s	0+	
	145	22 m	$\beta^-$	-72.94 s	1/2+	
	146m	80 s	IT 95.3%, $\beta^- + EC$ 4.7%	-72.18 s	11/2-	
	146	48.3 d	EC 99.93%, $\beta^+$ 0.07%	-75.361	0+	
	146	7 h	$\alpha$ , EC			
	147	30.1 h	EC 99.74%, $\beta^+$ 0.26%	-75.207	7/2-	
	148	98 y	$\alpha$	-76.266	0+	
	149	9.3 d	EC 99+%, $\alpha$ $5 \times 10^{-6}\%$	-75.131	7/2-	
	150	$1.8 \times 10^6$ y	$\alpha$	-75.765	0+	
	151	120 d	EC 99+%, $\alpha$ $\approx 10^{-7}\%$	-74.166	7/2-	
	152	16.222				
	152	$1.1 \times 10^{16}$ y	$\alpha$	-74.703	0+	$1.1 \times 10^3$
	153	241.6 d	EC	-73.119	3/2-	
	154	2.78		-73.704	0+	90
	155	14.62		-72.071	3/2-	$6.1 \times 10^4$
	156	20.62		-72.336	0+	2
	157	13.26		-70.825	3/2-	$2.55 \times 10^5$
	158	24.62		-70.891	0+	2.4
	160	10.6 h	$\beta^-$	-68.362	3/2-	

TABLE OF NUCLIDES

Z	Element	Nucleide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	A(MeV)	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
64	Cd	100	21.6%		-67.943	0+	0.77
		101	3.7 m	$\beta^-$	-65.507	5/2-	$4 \times 10^{-4}$
		102	9 m	$\beta^-$	-64.36	0+	
65	Tb	146	23 s	$\beta^+ + EC$	-67.26 s	(4-)	
		147	1.6 h	EC 95%, $\beta^+$ 5%	-70.51 s	5/2+	
		147	1.9 m	EC, $\beta^+$	-70.51 s	11/2-	
		148	2.2 m	EC + $\beta^+$		(9+)	
		148	60 m	EC 80%, $\beta^+$ 20%	-70.64	2-	
		149	4.15 h	EC 79%, $\beta^+$ 4.0%, $\alpha$ 17%	-71.434	(3/2, 5/2+)	
		149m	4.2 m	(EC, $\beta^+$ ) 99+%, $\alpha$ 0.020%	-71.394	(11/2-)	
		150	3.3 h	EC 90%, $\beta^+$ 10%, $\alpha$ 50.05%	-71.090	(2)-	
		150	6.0 m	EC + $\beta^+$		(8, 9+)	
		151	17.6 h	EC 99%, $\beta^+$ $\approx$ 1%, $\alpha$ 0.009%	-71.600	1/2(+)	
		152	17.5 h	EC 87%, $\beta^+$ 13%	-70.853	2-	
		152m	4.2 m	IT 78%, EC 22%	-70.361	(8+)	
		153	2.30 d	EC 99+%, $\beta^+$ 0.04%	-71.320	5/2+	
		154	21 h	EC 98%, $\beta^+$ 2%	-70.24	0(+)	
		154m <sub>1</sub>	9 h	EC + $\beta^+$ 78%, IT 22%		3(-)	
		154m <sub>2</sub>	23 h	EC 98%, IT 2%		(7, 8-)	
		155	5.3 d	EC	-71.256	3/2+	
		156	5.3 d	EC	-70.096	5-	
		156m	5.0 h	IT, EC, $\beta^+$ 0.02%, $\beta^+$ (weak)	-70.010	(0)+	
		156	24 h	IT			
		157	150 y	EC	-70.767	3/2+	
		158	150 y	EC 82%, $\beta^+$ 18%	-69.475	3-	
		158m	10.5 s	IT	-69.365	0-	
		159	102%		-69.536	3/2+	23
		160	72.1 d	$\beta^-$	-67.840	3-	500 <sup>m</sup>
		161	6.90 d	$\beta^-$	-67.466	3/2+	-
		162	7.7 m	$\beta^-$	-65.76	(1)-	
		163	19.5 m	$\beta^-$	-64.60	3/2+	
		164	3.0 m	$\beta^-$	-62.11	(5+)	
66	Dy	147m	59 s	IT, EC <sup>+</sup>	-63.45 s		
		148	3.1 m	EC + $\beta^+$	-67.77 s	0+	
		149	4.1 m	$\beta^+ + EC$	-67.53 s	(7/2-)	
		150	7.17 m	(EC, $\beta^+$ ) 69%, $\alpha$ 31%	-69.14 s	0+	
		151	17 m	EC + $\beta^+$ 94%, $\alpha$ 6%	-68.601	7/2-	
		152	2.37 h	EC 99.91%, $\alpha$ 0.09%	-70.116	0+	
		153	6.3 h	(EC, $\beta^+$ ) 99+%, $\alpha$ 0.010%	-69.155	7/2(-)	
		154	$\approx 1 \times 10^7$ y	$\alpha$	-70.392	0+	
		155	10.0 h	EC 97%, $\beta^+$ 3%	-69.157	3/2-	
		156	0.057%		-70.527	0+	33 <sup>m</sup>
		157	8.1 h	EC	-69.425	3/2-	
		158	0.100%		-70.410	0+	70 <sup>m</sup>
		159	144.4 d	EC	-69.171	3/2-	
		160	2.3%		-69.674	0+	80
		161	15.0%		-68.056	5/2+	570
		162	25.5%		-68.181	0+	160
		163	24.9%		-68.300	5/2-	130
		164	26.1%		-68.967	0+	$1.8 \times 10^3$ m 900 g
		165	2.33 h	$\beta^-$	-63.611	7/2+	$4.0 \times 10^3$ m
		165m	1.26 m	IT 97.8%, $\beta^+$ 2.2%	-63.503	1/2-	$2.1 \times 10^3$ m
		166	81.5 h	$\beta^-$	-62.563	0+	
		167	6.2 m	$\beta^-$	-59.97	(1/2-)	
67	Ho	160	40 s	$\beta^+ + EC$	-62.04 s	(8, 9+)	
		151	47 s	$\beta^+ + EC$ 90%, $\alpha$ 10%	-63.44 s		
		151	35.6 s	$\beta^+ + EC$ 80%, $\alpha$ 20%	-63.44 s		
		152	52 s	$\beta^+ + EC$ 94%, $\alpha$ 6%		(9+)	
		153	2.4 m	$\beta^+ + EC$ 98.3%, $\alpha$ 1.7%	-63.71	(3+)	

TABLE OF NUCLIDES

Z	Element	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$M(\text{MeV})$	$J^\pi$	$\sigma_n(\text{b})$
87	Mo	153	2.0 m	EC+ $\beta^+$ 99.96%, $\alpha$ 0.04%			
		153	9.3 m	EC+ $\beta^+$ 99.9%, $\alpha$ 0.1%	-64.954		
		153	27 m <sup>p</sup>	$\alpha$			
		154	12 m	$\beta^+$ +EC 99+%, $\alpha$ 0.017%	-64.635	1	
		154	3.2 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ <0.002%			
		155	49 m	EC, $\beta^+$ , $\alpha$	-66.055	5/2	
		156	56 m	$\beta^+$ +EC, IT		1	
		156	2 m	$\beta^+$ +EC	-65.43 s	(5+)	
		156	7.4 m <sup>p</sup>	$\beta^+$ +EC			
		157	12.6 m	$\beta^+$ , EC	-66.89	7/2-	
		158	11.5 m	EC, $\beta^+$	-66.433	5+	
		158m	27 m	IT 65%, EC+ $\beta^+$ 35%	-66.366	2-	
		158m <sub>1</sub>	21 m	EC+ $\beta^+$		(9+)	
		158	33 m	EC	-67.318	7/2-	
		158m	8.3 s	IT	-67.112	1/2+	
		160	25.6 m	EC 99+%, $\beta^+$ $\approx$ 0.0%	-66.388	5+	
		160m	5.02 h	IT 65%, (EC, $\beta^+$ ) 35%	-66.328	2-	
		160	3 s	$\gamma$			
		160	7 m	$\gamma$		1+	
		160	$\approx$ 1 h	$\gamma$		(9+)	
		161	2.46 h	EC	-67.203	7/2-	
		161m	6.7 s	IT	-66.992	1/2+	
		162	15 s	EC 95%, $\beta^+$ 5%	-66.047	1+	
		162m	68 m	IT 61%, EC+ $\beta^+$ 39%	-66.94	6-	
		163	$\approx$ 33 y	EC, $\alpha$ $\gamma$	-66.379	7/2-	
		163m	1.09 s	IT	-66.081	1/2+	
		164	29.0 m	EC 56%, $\beta^+$ 42%	-64.937	1+	
		164m	37 m	IT	-64.797	6(-)	
		165	100%		-64.896	7/2-	62 s 3 m
		166	26.80 h	$\beta^+$	-63.067	0-	
		166m	$1.2 \times 10^5$ y	$\beta^+$	-63.062	(7-)	
		167	3.1 h	$\beta^+$	-62.316	(7/2-)	
		168	3.0 m	$\beta^+$	-60.27	3+	
		168	4.6 m	$\beta^+$	-58.793	(7/2-)	
		170	43 s	$\beta^+$	-56.10		
		170	2.8 m	$\beta^+$	-56.09		
88	Er	161	23 s	$\beta^+$ +EC	-58.20 s		
		162	10 s	$\alpha$ $\approx$ 90%, EC+ $\beta^+$ $\approx$ 10%	-60.41 s	0+	
		163	36 s	EC+ $\beta^+$ $\approx$ 62%, $\alpha$ $\approx$ 38%	-60.31 s		
		164	3.8 m	EC+ $\beta^+$ 99.5%, $\alpha$ 0.5%	-62.44 s	0+	
		165	5 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ $\approx$ 0.02%	-62.057		
		166	20 m	EC+ $\beta^+$	-63.93 s	0+	
		167	24 m	$\beta^+$ , EC	-63.09 s	3/2-	
		168	2.4 h	EC, $\beta^+$	-65.03 s	0+	
		169	36 m	EC, $\beta^+$	-64.39	3/2-	
		169	26.6 h	EC, $\alpha$ $\gamma$	-66.052	0+	
		161	3.24 h	EC 99.96%, $\beta^+$ 0.04%	-65.197	3/2-	
		162	0.148 s		-66.335	0+	19
		163	75.1 m	EC 99+%, $\beta^+$ 0.004%	-65.168	5/2-	
		164	1.568 s		-65.940	0+	13
		165	10.4 h	EC, $\alpha$ $\gamma$	-64.518	5/2-	
		166	33.48 s		-64.921	0+	15 s <sup>a</sup> 5 s <sup>a</sup>
		167	22.98 s		-63.286	7/2+	650 s <sup>a</sup>
		167m	2.26 s	IT	-63.078	1/2-	
		168	27.18 s		-62.985	0+	2.0
		169	9.40 s	$\beta^+$	-60.917	1/2-	
		170	14.98 s		-60.104	0+	5.7
		171	7.52 h	$\beta^+$	-57.714	5/2-	300 s <sup>a</sup>
		172	49.5 s	$\beta^+$	-56.491	0+	
		173	12 m	$\beta^+$	-53.73	(7/2-)	
89	Yb	163	1.6 s	$\alpha$	-53.87 s		
		164	5 s	$\alpha$	-54.53 s		
		164	3.0 s	$\alpha$	-54.53 s		

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay mode	$\Delta$ (MeV)	J $\pi$	$\sigma_n$ (b)
68	Tm	156	38 s	$\alpha$	-56.45 s		
		158	80 s	$\alpha, \beta^+ + EC$	-56.94 s		
		159	19 s	$\alpha$	-56.94 s		
		157	3.6 m	$EC + \beta^+$	-56.49 s		
		158	4.0 m	$\beta^+ + EC$	-56.43 s		
		159	9.0 m	$EC, \beta^+$	-60.19 s	5/2(+) $\frac{1}{2}$	
		160	9.2 m	$EC, 95\% \beta^+ 5\%$	-60.13	7/2(+) $\frac{1}{2}$	
		161	30 m	$EC, \beta^+$	-61.68 s		
		161	7 m?	$\alpha$			
		162	22 m	$EC, 93\% \beta^+ 7\%$	-61.54	1-	
		162m	24 s	$IT, 90\% EC + \beta^+ 10\%$		(5+)	
		163	1.0 h	$EC, 99.6\% \beta^+ 0.2\%$	-62.99	1/2+	
		163m	11 m	$IT^*, EC^*$			
		164	2.0 m	$EC, 61\% \beta^+ 39\%$	-61.976	1+	
		164m	5.1 m	$IT, \approx 60\% EC + \beta^+ \approx 20\%$		6(-)	
		165	30.06 h	$EC, 99+\% \beta^+ 0.007\%$	-62.924	1/2+	
		166	7.7 h	$EC, 96\% \beta^+ 2\%$	-61.874	2+	
		167	9.25 d	$EC$	-62.537	1/2+	
		168	93.1 d	$EC \approx 98\% \beta^+ \approx 2\%$	-61.306	5(+)	
		169	100%		-61.260	1/2+	96 g
		170	126.6 d	$\beta^-, 99+\% EC, 0.144\%$	-59.791	1-	92 g
		171	1.92 y	$\beta^-$	-59.205	1/2+	4.5 g
		172	63.6 h	$\beta^-$	-57.380	2-	
		173	6.2 h	$\beta^-$	-56.226	(1/2+)	
		174	5.4 m	$\beta^-$	-53.85	(4-)	
		175	15 m	$\beta^-$	-52.29	(1/2+)	
		176	1.9 m	$\beta^-$	-49.59 s	(4+)	
		176	1.5 m?	$\beta^-$			
70	Yb	154	0.39 s	$\alpha$	-50.05 s	0+	
		155	1.6 s	$\alpha$	-50.45 s		
		156	24 s	$\alpha$	-53.06 s	0+	
		157	34 s	$\alpha$	-53.27 s		
		158	1.1 m	$EC + \beta^+$	-55.53 s	0+	
		160	4.8 m	$EC + \beta^+$	-57.35 s	0+	
		161	4.2 m	$\beta^+ + EC$	-57.40 s		
		162	18.9 m	$EC, \approx 98\% \beta^+ \approx 2\%$	-56.34 s	0+	
		163	11.0 m	$EC + \beta^+$	-59.62	(3/2-)	
		164	76 m	$EC$	-60.86 s	0+	
		166	10 m	$EC, \beta^+$	-60.161	(5/2)-	
		166	56.7 h	$EC$	-61.582	0+	
		167	17.5 m	$EC, 99.6\% \beta^+ 0.4\%$	-60.583	5/2-	
		168	0.135 s		-61.585	0+	3.5 $\times 10^3$ ppm
		169	32.0 d	$EC$	60.361	7/2+	
		169m	46 s	$IT$	-80.337	1/2-	
		170	5.1 s		-60.759	0+	10
		171	1.6 s		-59.302	1/2-	53
		172	2.1 s		-59.250	0+	1
		173	16.2 s		-57.546	5/2-	17
		174	3.1 s		-56.940	0+	19 g
		175	4.10 d	$\beta^-$	-54.691	7/2-	
		176	12.6 s		-53.490	0+	2.4 ppm
		176m	11.7 s	$IT$	-52.439	(8-)	
		177	1.9 h	$\beta^-$	-50.986	9/2+	
		177m	6.4 s	$IT$	-50.635	1/2-	
		179	74 m	$\beta^-$	-48.66	0+	
71	Lu	165	0.07 s	$\alpha$	-42.60 s		
		166	0.23 s	$\alpha$	-43.81 s		
		166	$\approx 0.5$ s	$\alpha$	-43.61 s		
		167	1.4 m?	$\beta^+ + EC$	-52.34 s		
		168	3.17 m	$\beta^+ + EC$	-54.58 s		
		168	11.8 m	$EC + \beta^+$	-56.16 s	1/2	
		169	2.6 m	$EC, \beta^+$	-56.10	(6-)	
		169m <sub>1</sub>	1.6 m	$EC + \beta^+, 56\% IT, 42\%$	-56.07	(3-)	
		169m <sub>2</sub>	2.1 m	$EC + \beta^+, > 80\%$	-56.00	(0-)	
		167	52 m	$EC, 98.2\% \beta^+ 1.8\%$	-57.46	7/2+	
		168	5.5 m	$EC, \beta^+$	-57.10	(6-)	
		169m	6.7 m	$EC, \approx 98\% \beta^+ \approx 2\%$	-56.98	3+	
		169	34.1 h	$EC, 99.3\% \beta^+ 0.7\%$	-57.861	7/2+	
		169m	2.7 m	$IT$	-57.852	1/2-	



# TABLE OF NUCLIDES

2	Nuclide	Abundance	Decay	A(MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(b)$
	KL A	or $t_{1/2}$	Mode			
71 Lu	170	2.02 d	EC, $\beta^+$	-57.319	0+	
	170m	0.7 s	IT	-57.226	4-	
	171	8.25 d	EC 99+%, $\beta^+$ $\approx$ 0.005%	-57.021	7/2+	
	171m	79 s	IT	-57.750	1/2-	
	172	6.70 d	EC	-56.726	4-	
	172m	3.7 m	IT	-56.684	1-	
	173	1.57 y	EC	-56.071	7/2+	
	174	3.3 y	EC 99+%, $\beta^+$ 0.025%	-55.582	(1-)	
	174m	142 d	IT 99.3%, EC 0.7%	-55.391	(6-)	
	175	97.388 y		-55.159	7/2+	16 m 10 g 2.0 $\times$ 10 <sup>3</sup> s 7 m
	176	2.618 <sup>+</sup> 3.6 $\times$ 10 <sup>16</sup> y	$\beta^-$	-53.361	7-	
	176m	3.68 h	$\beta^-$	-53.254	1-	
	177	6.71 d	$\beta^-$	-52.382	7/2+	
	177m	160.5 d	$\beta^-$ 76%, IT 22%	-51.412	23/2-	
	178	28.4 m	$\beta^-$	-50.30	1+	
	178m	23 m	$\beta^-$	-50.00	(9-)	
	178	5 m <sup>o</sup>	$\beta^-$	-49.11	(7/2+)	
	178	4.6 h	$\beta^-$	46.66		
	180	5.7 m	$\beta^-$	-38.96 s		
72 Hf	167	0.12 s	$\alpha$	-42.22 s	0+	
	168	3.0 s	$\alpha$	-42.80 s		
	168	5.6 s	$\alpha$	-45.75 s	0+	
	169	$\approx$ 12 s	$\alpha$	-46.13 s		
	169	17 s	$\alpha$	-33.46 s	0+	
	169	6.8 m	EC+ $\beta^+$	-53.15 s	(5/2-)	
	167	2.05 m	EC, $\beta^+$	-55.10 s	0+	
	168	25.9 m	EC $\approx$ 65%, $\beta^+$ $\approx$ 2%	-54.53	(5/2-)	
	169	3.3 m	EC 96%, $\beta^+$ 14%	-56.12 s	0+	
	170	16.0 h	EC	-55.30 s	7/2+	
	171	12.1 h	EC+ $\beta^+$	-56.33 s	0+	
	172	1.67 y	EC	-55.27 s	1/2-	
	173	24.0 h	EC	-55.830	0+	400
	174	0.168 <sup>+</sup>	$\alpha$	-54.548	5/2-	
	175	2.0 $\times$ 10 <sup>15</sup> y	EC	-54.567	0+	
	176	70 d		-52.879	7/2-	30 g 390 g 1.0 m
	176	5.28 <sup>+</sup>				
	177	16.68 <sup>+</sup>				
	177m <sub>1</sub>	1.1 s	IT	-51.564	23/2+	2 $\times$ 10 <sup>-7</sup> s <sub>g</sub>
	177m <sub>2</sub>	51 m	IT	-50.139	37/2-	
73 Ta	170	27.18 <sup>+</sup>		-52.434	0+	50 m
	170m <sub>1</sub>	4.0 s	IT	-51.267	8-	40 g
	170m <sub>2</sub>	31 y	IT	49.967	16+	
	170	1.178 <sup>+</sup>		-50.462	9/2+	50 g
	170m <sub>1</sub>	18.7 s	IT	-50.087	1/2-	0.4 $\mu$ m
	170m <sub>2</sub>	25.1 d	IT	-49.356	25/2-	
	180	35.28 <sup>+</sup>		-49.779	0+	14
	180m	5.5 h	IT	-48.637	8-	
	181	42.4 d	$\beta^-$	-47.403	1/2-	
	182	9 $\times$ 10 <sup>8</sup> y	$\beta^-$	-45.99	0+	30 s <sub>g</sub>
	182m	62 m	$\beta^-$ 54%, IT 46%	-44.82	(0-)	
	183	64 m	$\beta^-$	-43.269	(3/2-)	
	184	4.12 h	$\beta^-$	-41.48	0+	
	186	32 s	$\beta^+$ +EC	-46.10 s		
	187	3 m	$\beta^+$ +EC	-47.95 s		
	188	2.4 m	$\beta^+$ +EC	-48.40 s	(2-, 3+)	
	188	5 m	EC+ $\beta^+$	-50.03 s	(3+)	
	170	6.0 m	$\beta^+$ , EC	-50.12 s		
	171	24 m	EC+ $\beta^+$	-51.60 s		
	171	2.0 m <sup>o</sup>	$\gamma$			
	171	6.3 m <sup>o</sup>	$\gamma$			

# TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J^\pi$	$\alpha_s(h)$
73	Ta	172		117 m	EC $\approx 85\%$ , $\beta^+$ $\approx 15\%$	-51.41 s	(3-)	
		173		3.6 h	EC, $\beta^+$	-52.37 s	(5/2-)	
		174		1.1 h	EC, $\beta^+$	-51.96	3(+)	
		176		10.5 n	EC, $\beta^+$	-52.35 s	7/2+	
		178		0.1 h	EC 99.3%, $\beta^+$ 0.7%	-51.47	(1-)	
		177		56.6 h	EC 99+%, $\beta^+$ 2.9 $\times$ 10 <sup>-6</sup> %	-51.721	7/2+	
		178		9.3 m	EC 98.9%, $\beta^+$ 1.1%	-50.52	1+	
		178		2.4 h	EC		(7-)	
		178		1.7 y	EC, no $\gamma$	-50.347	(7/2+)	
		180(g)		2.0122 $\times$ 10 <sup>10</sup> y			(8+)	700
		180(m)		$\geq 1 \times 10^{13}$ y				
		181		0.1 h	EC 8.7%, $\beta^+$ 1.3%	-48.914	1	
		181		99.9977%		-48.425	7/2+	
		182		115 d	$\beta^-$	-46.417	3-	21
		182m <sub>1</sub>		0.28 s	IT	-46.400	5+	0.010 $\times$ 10 <sup>-2</sup>
		182m <sub>2</sub>		15.8 m	IT	-45.897	10-	0.2 $\times$ 10 <sup>-3</sup>
		183		5.1 d	$\beta^-$	-45.279	7/2+	
		184		6.7 h	$\beta^-$	-42.821	(5-)	
		185		49 m	$\beta^-$	-41.360	(7/2+)	
		186		10.5 m	$\beta^-$	-38.60	(3-)	
74	W	180		60.2 s?	$\alpha$		0+	
		182		$< 0.25$ s	$\alpha$	-34.13 s	0+	
		183		2.5 s	$\alpha_s(\beta^+ + \text{EC})^0$	-35.31 s		
		184		6 s	$\alpha$	-38.04 s	0+	
		186		5.1 s	$\alpha$	-38.67 s		
		188		16 s	$\alpha$	-41.48 s	0+	
		170		4 m	EC+ $\beta^+$	-46.92 s	0+	
		171		9 m	EC+ $\beta^+$	-46.90 s		
		172		6.7 m	EC, $\beta^+$	-45.81 s	0+	
		173		16 m	EC+ $\beta^+$	-48.47 s		
		174		29 m	EC	-50.08 s	0+	
		175		34 m	EC+ $\beta^+$	-49.45 s	(1/2-)	
		176		2.3 h	EC	-50.57 s	0+	
		177		135 m	EC+ $\beta^+$	-49.72 s	(1/2-)	
		178		21.5 d	EC, no $\gamma$	-50.43	0+	
		178		36 m	BC	-49.283	(7/2-)	
		178m		6.8 m	IT 99.69%, EC 0.31%	-49.061	(1/2-)	
		180		2.15 $\times$ 10 <sup>10</sup> y		-46.624	0+	$\approx 10^{-20}$
		181		121 d	EC	-46.237	9/2+	
		182		26.3 $\times$ 10 <sup>10</sup> y		-48.228	0+	21 $\times$ 10 <sup>-20</sup>
		183		14.3 $\times$ 10 <sup>10</sup> y		-48.347	1/2-	10.1
		183m		5.3 s	IT	-46.038	(11/2)+	
		184		30.7 $\times$ 10 <sup>10</sup> y		-45.687	0+	1.8 $\times$ 10 <sup>-20</sup>
		185		75.1 d	$\beta^-$	-43.370	3/2-	
		185m		1.66 m	IT	-43.173	11/2+	
		186		22.8 $\times$ 10 <sup>10</sup> y		-42.498	0+	38
		187		23.9 h	$\beta^-$	-39.893	3/2-	70
		188		69.4 d	$\beta^-$	-38.657	0+	
		189		11.5 m	$\beta^-$	-35.47		
		190		30 m	$\beta^-$	-34.22	0+	
75	Re	170		0.0 s	$\beta^+ + \text{EC}$	-38.92 s		
		172		30 s	$\beta^+ + \text{EC}$	-41.51 s		
		174		2.3 m	$\beta^+ + \text{EC}$	-43.56 s		
		175		4.6 m	EC+ $\beta^+$	-45.15 s		
		176		5.2 m	EC+ $\beta^+$	-44.97 s		
		177		14 m	EC+ $\beta^+$	-46.12 s	(5/2-)	
		178		13.2 m	EC 99%, $\beta^+$ 11%	-45.77	(3)	
		179		19.7 m	EC 99.1%, $\beta^+$ 0.9%	-46.59	(5/2+)	
		180		2.4 m	EC 92%, $\beta^+$ 8%	-45.829	(1)-	
		181		20 h	EC	-48.44 s	5/2+	
		182		64 h	EC	-45.43 s	7+, 6z	
		182		12.7 h	EC 99.8%, $\beta^+$ 0.2%	-45.43 s	2+	
		183		71 d	EC	-45.791	(5/2)+	
		184		38 d	EC	-44.191	3-	
		184m		160 d	IT 75%, EC 25%	-44.003	0+	
		184		2.2 d?	?			

# TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(b)$
76	Re	185	37.40%		-43.802	5/2+	110 <sub>n</sub>
	186	90.6 h	$\beta^-$ 92.2%, EC 7.8%	-41.910	1-	0.3 <sub>n</sub>	
	186m	$2 \times 10^{15}$ y	IT	-41.76	[8+]		
	187	62.60%	$\beta^-$ no $\gamma$	-41.205	5/2+	74 <sub>g</sub>	
	188	16.9 h	$\beta^-$	-39.006	1-	1.0 <sub>n</sub>	
	188m	18.7 m	IT	-38.834	(6)-		
	189	24.3 h	$\beta^-$	-37.970	(5/2+)		
	190	4.3 d	$\beta^-$	-35.52	(2-)		
	190m	3.1 m	$\beta^-$	-35.30	(6-)		
	191	3.2 h	$\beta^-$ $\approx$ 51%, IT $\approx$ 49%	-34.343			
	192	9.8 m	$\beta^-$	-31.9 s			
	193	16 s	$\beta^-$	-30.55 s			
	194	3.0 s	$\alpha$	-33.53 s	0+		
	195	7.1 s	$\alpha$	-34.16 s	0+		
	196	8 s	$\alpha$	-36.84 s			
	197	19 s	EC + $\beta^+$ 99 + %, $\alpha$ 50.3%	-37.41 s			
	198	16 s	$\beta^+$ + EC 99.98%, $\alpha$ 0.02%	-39.62 s	0+		
	199	45 s	EC + $\beta^+$ 99.96%, $\alpha$ 0.02%	-39.71 s	0+		
	200	1.4 m	[EC + $\beta^+$ ]	-39.71 s			
	201	3.6 m	EC + $\beta^+$	-41.81 s	0+		
	202	4 m	EC + $\beta^+$	-41.62 s			
	203	5.0 m	EC + $\beta^+$	-43.35 s	0+		
204	7 m	EC + $\beta^+$	-42.89 s				
205	22 m	EC	-44.22 s	0+			
206	105 m	EC + $\beta^+$	-43.41 s	(1/2-)			
207	2.7 m	EC, $\beta^+$	-44.56 s	(7/2-)			
208	22.0 h	EC	-43.49 s	0+			
209	13 h	EC 99.91%, $\beta^+$ 0.09%	-43.32 s	9/2+			
210	8.9 h	EC 89%, IT 11%	-44.233	1/2-			
211	93.6 d	EC	-42.787	0+	3 $\times$ 10 <sup>3</sup>		
212	1.6%		-42.987	1/2-			
213	$2 \times 10^{15}$ y	$\alpha$	-41.208	0+	80		
214	1.6%		-41.125	0+	330		
215	$1.3 \times 10^8$		-38.976	3/2-	55 <sub>g</sub>		
216	16.1%		-38.947	9/2-	20 <sub>g</sub>		
217	5.7 h	IT	-38.699	0+	2.6 $\times$ 10 <sup>-4</sup> m		
218	26.4%		-36.994	10-	9 <sub>m</sub>		
219	9.9 m	IT	-36.308	9/2-	4 <sub>g</sub>		
220	15.4 d	$\beta^-$	-36.314	3/2-			
221	13.1 h	IT	-35.875	0+	2.0		
222	71.0%	$\beta^-$	-33.060	(10-)			
223	6.1 s	IT	-33.367	(3/2-)	1.5 $\times$ 10 <sup>3</sup> m		
224	30.6 h	$\beta^-$	-32.417	0+			
225	6.0 y	$\beta^-$	-29.69				
226	6.5 m	$\beta^-$					
227	35.0 m	$\beta^-$					
77	Ir	171	1.0 s	$\alpha$	-26.18 s	0+	
	172	1.7 s	$\alpha$	-27.32 s			
	173	3.0 s	$\alpha$	-29.91 s			
	174	4 s	$\alpha$	-30.69 s			
	175	4 s	$\alpha$	-33.16 s			
	176	8 s	$\alpha$	-33.64 s			
	177	21 s	$\alpha$	-35.82 s			
	178	12 s	$\beta^+$ + EC	-36.27 s			
	179	4 m	EC + $\beta^+$	-37.09 s			
	180	1.5 m	EC + $\beta^+$	-37.93 s			
	181	5 m	EC + $\beta^+$	-39.34 s			
	182	15 m	EC + $\beta^+$	-38.98 s			
	183	0.9 h	EC + $\beta^+$	-40.09 s	(9/2-)		
	184	3.0 h	EC, $\beta^+$	-39.51	5		

# TABLE OF NUCLIDES

Z	Element	Isotope	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$A$ (MeV)	$J^\pi$	$\sigma_n(h)$
77	Ir	185	14 h	EC+ $\beta^+$	-40.29 s	5/2(-)	
		186	16 h	EC 98%, $\beta^+$ 2%	-39.156	5(+)	
		187	1.7 h	EC, $\beta^+$		(2-)	
		187	10.5 h	EC	-39.71 s	3/2+	
		188	41.5 h	EC 99.6%, $\beta^+$ 0.4%	-38.323	2-	
		189	13.1 d	EC	-38.48 s	3/2+	
		190	11.0 d	EC	-36.70	(4+)	
		190m <sub>1</sub>	1.2 h	IT	-36.67	(7+)	
		190m <sub>2</sub>	3.2 h	EC 95%, IT 5%	-36.52	(11-)	
		191	37.38'		-36.698	3/2+	540 <sub>g</sub> 400 <sub>nat</sub> 0.10 <sub>nat</sub>
		191m	4.9 s	IT	-36.527	11/2-	
		192	74.2 d	$\beta^-$ 95.4%, EC 4.6%	-34.626	4(-)	1.0 $\times 10^{13}$ <sub>g</sub>
		192m <sub>1</sub>	1.45 m	IT 99+%, $\beta^-$ 0.017%	-34.768	1(+)	
		192m <sub>2</sub>	241 y	IT	-34.665	9(+)	
		193	62.78'		-34.519	3/2+	110 <sub>g</sub> 0.05 <sub>m</sub>
		193m	10.6 d	IT	-34.439	11/2-	
		194	19.2 h	$\beta^-$	-32.514	1-	
		194m	0.47 y	$\beta^-$		(11)	
		195	2.5 h	$\beta^-$	-31.682	(3/2+)	
		195m	3.8 h	$\beta^-$	-31.57	(11/2-)	
		196	52 s	$\beta^-$	-29.44	(0,1-)	
		196m	1.40 h	$\beta^-$	-29.01	(10,11)	
		197	9.8 m	$\beta^-$	-28.43		
		198	8 s	$\beta^-$	-25.52		
78	Pt	173	61 s	$\alpha$	-21.79 s		
		174	0.7 s	$\alpha$ ~80%	-24.83 s	0+	
		175	2.4 s	$\alpha$ ~75%	-25.64 s		
		176	6.3 s	$\alpha$ 42%	-26.54 s	0+	
		177	7 s	$\alpha$ 9%	-29.35 s		
		178	21 s	$\alpha$ 7%	-31.63 s	0+	
		179	33 s	$\alpha$ 0.27%	-32.01 s	1/2	
		180	52 s	$\alpha$ ~0.3%	-34.12 s	0+	
		181	51 s	$\alpha$ ~0.06%	-34.06 s		
		182	2.6 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ ~0.02%	-35.98 s	0+	
		183	7 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ ~0.0013%	-35.63 s		
		184	17.3 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ ~0.001%	-37.21 s	0+	
		184	42 m <sup>a</sup>	EC			
		185	71 m	EC+ $\beta^+$	-36.49 s		
		186	33 m	EC+ $\beta^+$	-36.49 s		
		186	2.0 h	EC 99+%, $\alpha$ ~1.4 $\times 10^{-6}$ %	-37.83 s	0+	
		187	2.35 h	EC+ $\beta^+$	-36.81 s	3/2	
		188	10.2 d	EC 99+%, $\alpha$ 3 $\times 10^{-5}$ %	-37.708	0+	
		189	10.9 h	EC, $\beta^+$	-36.57 s	3/2-	
		190	6.07, 13'				800
		191	6 $\times 10^{11}$ y	$\alpha$	-37.318	0+	
		191	2.9 d	EC	-35.688	3/2-	
		192	6.768'		-36.263	0+	10 <sub>g+m</sub> 2 <sub>m</sub> <sup>a</sup>
		193	50 y	EC, no $\gamma$	-34.450	(1/2)-	
		193m	4.3 d	IT	-34.308	(13/2)+	
		194	32.98'		-34.785	0+	~1 <sub>g</sub> 1 <sub>g</sub>
		195	31.68'		-32.802	1/2-	0.09 <sub>g</sub> <sup>a</sup>
		195m	4.02 d	IT	-32.543	13/2+	27 <sub>g</sub>
		196	25.38'		-32.652	0+	0.7 <sub>g</sub> <sup>a</sup> 0.05 <sub>m</sub> <sup>a</sup>
		197	18.3 h	$\beta^-$	-30.431	1/2-	
		197m	94 m	IT 97%, $\beta^-$ 3%	-30.032	13/2+	
		198	7.28'		-29.921	0+	3.7 <sub>g</sub> 0.027 <sub>m</sub>

# TABLE OF NUCLIDES

Z	Element	Nucleide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(McV)$	$J\pi$	$a_n(b)$
78	Pt	190	30.8 m	$\beta^-$	-27.420	(5/2-)	$\approx 15^{10}$
		190m	14 s	IT	-26.996	(13/2+)	
		200	12.6 h	$\beta^-$	-26.60 s	0+	
		201	2.5 m	$\beta^-$	-23.74		
79	Au	175	$\approx 0.14$ s	$\alpha$	-17.16 s		
		176	1.2 s	$\alpha$	-16.40 s		
		177	1.3 s	$\alpha$	-21.19 s		
		178	2.6 s	$\alpha$	-22.41 s		
		179	7.5 s	$\alpha$	-24.75 s		
		181	11 s	$\alpha$ 1.1%	-27.64 s		
		182	21 s	$\beta^+ + EC$ 99+%, $\alpha$ $\approx 0.04\%$	-28.18 s		
		183	42 s	$\alpha$ 0.30%	-30.01 s		
		184	53 s	$\beta^+ + EC$ 99+%, $\alpha$ 0.022%	-30.22 s		
		186	4.3 m	$EC + \beta^+$ 99.91%, $\alpha$ 0.09%	-31.73 s		
		185	6.6 m	$EC + \beta^+$	-31.73 s		
		186	11 m	$EC + \beta^+$	-31.69 s	3	
		189	62 m	$EC + \beta^+$	-31.69 s		
		187	8 m	$EC + \beta^+, \alpha^0$	-32.87 s	1/2	
		188	6.6 m	$EC + \beta^+$	-32.49 s	1	
		188m	26.7 m	$EC + \beta^+, IT^0$	-33.41 s	1/2+	
		189	43 m	$EC$ 98%, $\beta^+$ 2%	-33.16 s	11/2-	
		191	3.2 h	EC	-32.876	1-	
		191m	0.9 s	IT	-33.60	3/2+	
		192	5.0 h	$EC$ $\approx 99\%$ , $\beta^+$ $\approx 1\%$	-32.760	(11/2-)	
		193	17.5 h	$EC, \beta^+$	-33.36 s	3/2+	
		193m	3.9 s	IT 99.97%, $EC$ 0.03%	-33.07 s	11/2-	
		194	39.5 h	$EC$ $\approx 97\%$ , $\beta^+$ $\approx 3\%$	-32.756	1-	
		195	163 d	EC	-32.572	3/2+	
		195m	30.6 s	IT	-32.753	1/2-	
		196	6.18 d	$EC$ 95.0%, $\beta^+$ $5 \times 10^{-5}\%$ , $\beta^-$ 7.0%	-31.162	2-	
		196m <sub>1</sub>	8.2 s	IT	-31.077	5+	
		196m <sub>2</sub>	9.7 h	IT	-30.567	12-	
		197	1008		-31.150	3/2+	96.6
		197m	7.7 s	IT	-30.741	11/2-	
		198	2.686 d	$\beta^-$	-29.591	2-	$2.5 \times 10^4$
		198m	2.30 d	IT	-28.779	(12-)	
		199	3.14 d	$\beta^-$	-29.104	3/2+	
		200	48.4 m	$\beta^-$	-27.30	1(-)	$\approx 30^{10}$
		200m	16.7 h	$\beta^-$ $\approx 64\%$ , IT $\approx 16\%$	-26.3	12(-)	
		201	26 m	$\beta^-$	-26.40	(3/2+)	
		202	28 s	$\beta^-$	-23.06	(1-)	
		203	53 s	$\beta^-$	-22.98 s		
		204	4 s <sup>0</sup>	$\beta^-$			
		204	40 s	$\beta^-$			
80	Hg	177	$\approx 0.2$ s	$\alpha$	-12.65 s		
		178	0.5 s	$\alpha$ $\approx 64\%$ , $[EC + \beta^+]$ $\approx 16\%$	-15.93 s	0+	
		179	1.09 s	$\alpha$ $\approx 53\%$ , $[EC + \beta^+]$ $\approx 47\%$ , ( $EC + \beta^+$ )p	-16.80 s		
		179	3.5 s <sup>0</sup>	$\mu$	-16.80 s		
		180	2.9 s	$\alpha$	-19.86 s	0+	
		180	5.9 s <sup>0</sup>	$\alpha$			
		181	3.6 s	$\beta^+ + EC$ 74%, $\alpha$ 26%, ( $\beta^+ + EC$ )p 0.014%, ( $\beta^+ + EC$ )n $9 \times 10^{-4}\%$	-20.79 s	1/2(-)	
		182	11 s	$EC + \beta^+$ 91%, $\alpha$ 9%	-23.21 s	0+	
		183	8.8 s	$EC$ 61%, $\beta^+$ 27%, $\alpha$ 12%, ( $EC + \beta^+$ )p $3 \times 10^{-4}\%$	-23.68 s	1/2	
		184	30.6 s	$EC + \beta^+$ 98.7%, $\alpha$ 1.3%	-26.04 s	0+	
		185(a)	48 s	$EC + \beta^+$ $\approx 95\%$ , $\alpha$ $\approx 5\%$	-26.14 s	1/2-	
		185(m)	17 s	$\alpha, IT^0$			
		186	155 s	$\gamma$			
		188	1.4 m	$EC$ 96%, $\beta^+$ 4%, $\alpha$ 0.016%	-26.35 s	0+	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(M-V)$	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
80	Hg	187		1.6 m	EC+ $\beta^+$ , $\alpha > 2.5 \times 10^{-7}\%$	-28.06 s		
		187		2.4 m	EC+ $\beta^+$ , $\alpha > 1.2 \times 10^{-6}\%$	-28.08 s		
		187		3.0 m	EC+ $\beta^+$ , $\alpha$		3/2	
		188		3.3 m	EC+ $\beta^+$	-29.88 s	0+	
		188		8.7 m	EC+ $\beta^+$	-29.21 s	(13/2+)	
		188		7.5 m	EC+ $\beta^+$	-29.21 s	3/2-	
		190		20 m	EC	-30.98	0+	
		191		$\approx 49$ m	EC+ $\beta^+$	-30.48	(3/2-)	
		191m		51 m	EC+ $\beta^+$	$\approx 30.34$	(13/2+)	
		192		4.9 h	EC	-31.97 s	0+	
		193		4 h	EC, $\beta^+$	-31.02 s	3/2-	
		193m		11 h	EC 92%, $\beta^+$ 0.34%, IT 8%	-30.88 s	13/2+	
		194		260 y	EC, no $\gamma$	-32.206	0+	
		194		0.40 s	$\gamma$		1/2-	
		195		10 h	EC	-31.05	1/2-	
		195m		41 h	EC 50%, IT 50%	-30.87	13/2+	
		196		0.158 s		-31.846	0+	$3.0 \times 10^{-3} \mu$ 120%
		197		64.1 h	EC	-30.735	1/2-	
		197m		23.8 h	IT 93%, EC 7%	-30.436	13/2+	
		198		10.02 s		-30.964	0+	0.018 $\mu$
		199		16.82 s		-29.557	1/2-	$2 \times 10^3$
		199m		42.6 m	IT	-29.025	13/2+	
		200		2.17 s		-29.514	0+	<60
		201		1.17 s		-27.872	3/2-	<60
		202		29.68 s		-27.356	0+	5.0
		203		46.8 d	$\beta^-$	-25.277	5/2-	
		204		6.86 s		-24.703	0+	0.4 $\mu$
		205		5.2 m	$\beta^-$	-22.299	1/2-	
		206		8.1 m	$\beta^-$	-20.955	0+	
81	Tl	184		11 s	$\beta^-$ +EC 98%, $\alpha$ 2%	-16.90 s		
		185m		1.7 s	$\alpha$ , IT	-18.86 s	(9/2-)	
		186		28 s	( $\beta^-$ , EC) 99+%, $\alpha$ ? $\approx 0.006\%$	-19.06 s		
		186m		3 s	IT	-19.49 s		
		187m		16 s	$\alpha$ , IT	$\approx 21.60$ s	(9/2-)	
		188		71 s	$\beta^+$ , EC	-22.29 s	(7)	
		189		1.4 m	$\beta^+$ +EC	-24.02 s		
		189		2.3 m	$\beta^+$ +EC	-24.02 s		
		190		2.6 m	$\beta^+$ , EC	-24.18	(2-)	
		190		3.7 m	$\beta^+$ , EC	-24.18	(7+)	
		191		5.2 m	EC 98%, $\beta^+$ 2%	-25.67		
		192		10.8 m	EC+ $\beta^+$	-25.59 s	(7+)	
		192		10.8 m	EC+ $\beta^+$	-25.59 s	(2-)	
		193		22 m	EC 89%, $\beta^+$ 54%	-27.02 s	1/2+	
		193m		2.1 m	IT	-26.81 s	(9/2-)	
		194		33.0 m	EC+ $\beta^+$	-26.81 s	2-	
		194m		32.8 m	EC+ $\beta^+$	$\approx 26.51$ s	(7+)	
		195		1.16 h	EC 99.3%, $\beta^+$ 0.7%	-27.85	1/2+	
		195m		3.6 s	IT	-27.37	9/2-	
		196		1.04 h	EC+ $\beta^+$	-27.35 s	2(-)	
		196m		1.41 h	EC+ $\beta^+$ 96.2%, IT 3.8%	-26.85 s	(7+)	
		197		2.84 h	EC 99.5%, $\beta^+$ 0.5%	-26.33 s	1/2+	
		197m		0.54 s	IT	-27.72 s	9/2-	
		198		5.3 h	EC $\approx 99.3\%$ , $\beta^+$ $\approx 0.7\%$	-27.50	2-	
		198m		1.07 h	EC+ $\beta^+$ 56%, IT 44%	-26.96	7+	
		199		7.4 h	EC	-26.08	1/2+	
		200		26.1 h	EC 99.65%, $\beta^+$ 0.35%	-27.080	2-	
		201		73 h	EC	-27.185	1/2+	
		202		12.2 d	EC	-25.988	2-	
		203		28.8 d		-25.789	1/2+	10
		204		3.77 y	$\beta^-$ 97.4%, EC 2.6%	-24.353	2-	22%
		205		70.58 s		-23.637	1/2+	$0.10 \times 10^3$
		206		4.20 m	$\beta^-$	-22.260	0-	
		206m		3.6 m	IT	-19.626	(12-)	
		207		4.77 m	$\beta^-$	-21.041	1/2+	
		207m		1.3 s	IT	-19.700	11/2-	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$Q$ (MeV)	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
81	Tl	208		3.053 m	$\beta^-$	-16.768	(5+)	
		209		2.2 m	$\beta^-$	-13.650	(1/2+)	
		210		1.30 m	$\beta^-$ , $\beta^-n$ 0.007%	-9.251		
82	Pb	185		$\approx 2$ s	$\alpha$	-11.74 s		
		186		8 s	$\alpha$ 0.4%	-14.33 s	0+	
		187		17 s	$\alpha$ 0.02%	-14.94 s		
		188		25 s	EC+ $\beta^+$ 97%, $\alpha$ 3%	-17.50 s	0+	
		189		51 s	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ 0.4%	-17.06 s		
		190		1.2 m	EC+ $\beta^+$ 99.8%, $\alpha$ 0.2%	-20.22 s	0+	
		191		1.3 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ 0.013%	-20.23 s		
		192		2.5 m	EC+ $\beta^+$ 99+%, $\alpha$ 0.007%	-22.29 s		
		193		5.8 m	EC+ $\beta^+$	-22.07 s	(13/2+)	
		194		11 m	EC+ $\beta^+$	-23.81 s	0+	
		195		16.4 m	EC+ $\beta^+$	-23.55 s	(13/2+)	
		196		37 m	EC	-25.15 s	0+	
		197		s	EC+ $\beta^+$	-24.63 s	(3/2-)	
		197m		42 m	EC+ $\beta^+$ 81%, IT 19%	-24.31 s	(13/2+)	
		198		2.4 h	EC	-25.90 s	0+	
		199		1.5 h	EC 99.6%, $\beta^+$ 0.4%	-25.28	5/2-	
		199m		12.2 m	IT 93%, EC+ $\beta^+$ 7%	-24.86	13/2+	
		200		21.5 h	EC	-26.16 s	0+	
		201		9.4 h	EC 99+%, $\beta^+$ 0.034%	-25.327	5/2-	
		201m		61 s	IT	-24.689	13/2+	
		202		$\approx 3 \times 10^3$ y	EC, no $\gamma$	-25.942	0+	
		202m		3.62 h	IT 90.5%, EC 9.5%	-23.772	9-	
		203		52.0 h	IT	-24.794	5/2-	
		203m <sub>1</sub>		6.1 s	IT	-23.969	13/2+	
		203m <sub>2</sub>		0.18 s	IT	-21.844	29/2-	
		204		1.42% 2.2% 2.2%		-25.117	0+	0.7
		204m		66.9 m	IT	-22.932	9-	
		205		$1.4 \times 10^7$ y	EC, no $\gamma$	-23.777	5/2-	3.8 <sup>m</sup>
		206		24.1% 22.1%		-23.795	0+	0.03
		207		22.1% 22.1%		-22.463	1/2-	0.71
		207m		0.81 s	IT	-20.830	13/2+	
		208		57.3% 57.3%		-21.759	0+	$5 \times 10^{-4}$
		209		3.25 h	$\beta^-$ , no $\gamma$	-17.624	9/2+	
		210		22.3 y	$\beta^-$ 99+%, $\alpha$ $1.7 \times 10^{-6}$ %	-14.738	0+	0.5
		211		36.1 m	$\beta^-$	-10.492	(9/2)+	
		212		10.64 h	$\beta^-$	-7.562	0+	
		213		10.2 m	$\beta^-$	-3.14 s		
		214		26.8 m	$\beta^-$	-0.185	0+	
83	Bi	180		<1.5 s	$\alpha$	-9.87 s		
		181		5.4 s	$\alpha$ 0.0%	-10.85 s		
		181		13 s	$\alpha$ 0.0%	-13.05 s		
		191m		$\approx 20$ s	$\alpha$			
		182		42 s	$\alpha$ 0.20%	-13.67 s		
		183		64 s	$\alpha$ 0.50%	-15.56 s		
		193m		3.5 s	$\alpha$ 0.25%			
		194		1.7 m	$\beta^+$ +EC 99+%, $\alpha$ <0.2%	-15.98	(10-)	
		195		2.8 m	$\alpha$ <0.2%	-17.69		
		196m		90 s	$\alpha$ 0%			
		198		4.5 m	$\beta^+$ +EC	-17.76 s		
		197(m)		8 m	$\beta^+$ +EC 99.99%, $\alpha$ 0.11%			
		199		11.8 m	EC+ $\beta^+$	-19.30 s	(7+)	
		199m		7.7 s	IT	-19.05 s	(10-)	
		199(g)		27 m	EC	-20.61 s	9/2-	
		199(m)		24.7 m	EC	-20.00 s		
		200		36 m	EC, $\beta^+$ (weak)	-20.46 s	7(+)	
		200m		0.40 s	IT	-20.03 s	10(-)	
		201		1.8 h	EC+ $\beta^+$	-21.41 s	9/2-	
		201m		59 m	EC+ $\beta^+$ , IT, $\alpha$ 20.02%	-20.56 s	(1/2+)	
		202		1.7 h	EC 99.5%, $\beta^+$ 0.5%	-21.04 s	5(+)	
		203		11.8 h	EC 99.7%, $\beta^+$ 0.3%	-21.60	9/2-	
		204		11.2 h	EC	-20.62 s	6+	
		205		15.3 d	EC 99.90%, $\beta^+$ 0.10%	-21.070	9/2-	
		206		6.243 d	EC, $\beta^+$ $8 \times 10^{-6}$ %	-20.033	6+	
		207		38 y	EC 99+%, $\beta^+$ 0.012%	-20.058	9/2-	
		208		$3.68 \times 10^8$ y	EC	-18.679	(5)+	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide or $t_{1/2}$	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$A(\text{MeV})$	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
83	Bi	209		100%		-18.268	9/2-	0.019 <sup>m</sup> 0.014 <sup>s</sup> 0.050 <sup>n</sup>
		210	5.01 d	$\beta^-$ 99.7%, $\alpha$ 1.3 $\times 10^{-6}\%$	-14.801	1		
		210m	5.0 $\times 10^5$ y	$\alpha$	-14.530	9-		
		211	2.15 m	$\alpha$ 99.72%, $\beta^-$ 0.28%	-11.865	(9/2)-		
		212	60.60 m	$\beta^-$ 64.0%, $\beta^-$ $\alpha$ 0.014%, $\alpha$ 36.0%	-8.135	1(-)		
		212m <sub>1</sub>	25 m	$\alpha$ 59.3%, $\beta^-$ 27%	-7.88	[9-]		
		212m <sub>2</sub>	9 m	$\beta^-$ 5100%		[15-]		
		213	45.6 m	$\beta^-$ 97.6%, $\alpha$ 2.2%	-5.243	(9/2-)		
		214	19.7 m	$\beta^-$ 99.7%, $\beta^-$ $\alpha$ 0.0031%, $\alpha$ 0.021%	-1.209	(1-)		
		215	7 m	$\beta^-$	1.71			
84	Po	183	51 s	$\alpha$	-8.31 s			
		184	0.6 s	$\alpha$	-10.81 s	0+		
		186(g)	4.5 s	$\alpha$	-11.06 s			
		186(m)	2.0 s	$\alpha$				
		188	5 s	$\alpha$	-13.21 s	0+		
		187	56 s	$\alpha$ 90%	-13.23 s			
		187m	26 s	$\alpha$				
		188	1.78 m	$\alpha$ 70%, EC+ $\beta^+$ 30%	-15.07 s	0+		
		189	5.2 m	EC+ $\beta^+$ 68%, $\alpha$ 12%	-15.05 s	{3/2-}		
		189m	4.2 m	EC+ $\beta^+$ 61%, $\alpha$ 39%		(13/2+)		
		190	11.4 m	EC+ $\beta^+$ 86%, $\alpha$ 14%	-16.74 s	0+		
		201	15.2 m	EC+ $\beta^+$ 96.4%, $\alpha$ 1.6%	-16.41 s	3/2(-)		
		201m	8.9 m	IT 53%, EC+ $\beta^+$ 44%, $\alpha$ 2.5%	-15.98 s	(13/2+)		
		202	44 m	EC+ $\beta^+$ 96.0%, $\alpha$ 2.0%	-17.78 s	0+		
		203	33 m	EC+ $\beta^+$ 99.69%, $\alpha$ 0.1%	-17.36	5/2-		
		203m	1.2 m	IT 96%, EC+ $\beta^+$ 4%	-16.72	(13/2+)		
		204	3.57 h	EC 99.4%, $\alpha$ 0.6%	-18.25 s	0+		
		205	1.80 h	EC+ $\beta^+$ 99.5%, $\alpha$ 0.5%	-17.576	5/2-		
		206	8.0 d	EC 94.5%, $\alpha$ 5.5%	-18.190	0+		
		207	5.7 h	EC 99.5%, $\beta^+$ 0.5%, $\alpha$ 0.008%	-17.150	5/2-		
		207m	2.8 s	IT	-15.786	19/2-		
		208	2.90 y	$\alpha$ 99.7%, EC 0.0018%	-17.475	0+		
		209	102 y	$\alpha$ 99.74%, EC 0.26%	-16.373	1/2-		
		210	138.38 d	$\alpha$	-15.963	0+		<0.03 <sup>m</sup> <5 $\times 10^{-4}$ <sup>s</sup> <0.002 <sup>n</sup>
		211	0.516 s	$\alpha$	-12.444	(9/2+)		
		211m	25 s	$\alpha$	-10.982	(25/2+)		
		212	0.30 $\mu$ s	$\alpha$	-10.381	0+		
		212m	45 s	$\alpha$	-7.476	[16+]		
		213	4 $\mu$ s	$\alpha$	-6.663	9/2+		
		214	164 $\mu$ s	$\alpha$	-4.479	0+		
		215	1.78 ms	$\alpha$ 99.7%, $\beta^-$ 2.3 $\times 10^{-6}\%$	-0.540	(9/2)+		
		216	0.15 s	$\alpha$	1.769	0+		
		217	<10 s	$\alpha$	5.96 s			
		218	3.05 m	$\alpha$ 99.7%, $\beta^-$ 0.018%	8.355	0+		
85	At	186	0.3 s	$\alpha$	-4.05 s			
		187	0.4 s	$\alpha$	-6.03 s			
		188	4.9 s	$\alpha$	-8.67			
		188m	1.5 s	$\alpha$				
		189	7.2 s	$\alpha$	-8.47			
		200(g)	42 s	$\alpha$ 53%, EC+ $\beta^+$ 47%	-8.67 s			
		200(m)	4.3 s	$\alpha$				
		201	1.5 m	$\alpha$ 71%, EC+ $\beta^+$ 29%	-10.52 s			
		202	3.0 m	EC+ $\beta^+$ 85%, $\alpha$ 15%	-10.52 s			
		203	7.3 m	EC+ $\beta^+$ 69%, $\alpha$ 31%	-11.97 s			
		204	9.1 m	EC+ $\beta^+$ 95.6%, $\alpha$ 4.4%	-11.97 s	(5+)		
		205	26 m	EC 87%, $\beta^+$ 3%, $\alpha$ 10%	-12.96 s	9/2-		
		206	31 m	EC 82%, $\beta^+$ 17%, $\alpha$ 1.0%	-12.73 s	(5+)		



# TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\alpha$ (MeV)	$\beta m$	$\sigma_n(b)$
86	At	207		1.8 h	EC+ $\beta^+$ $\approx 90\%$ , $\alpha$ 10%	-13.31	9/2-	
		208		1.63 h	EC+ $\beta^+$ 99.4%, $\alpha$ 0.6%	-12.64 s	(6+)	
		209		5.4 n	EC 95.9%, $\alpha$ 4.1%	-12.880	9/2-	
		210		0.3 h	EC+ $\beta^+$ 99.82%, $\alpha$ 0.18%	-11.976	5+	
		211		7.21 h	EC 56.1%, $\alpha$ 41.9%	-11.653	9/2-	
		212		0.315 s	$\alpha$	-8.625		
		212m		0.12 s	$\alpha$	-8.403		
		213		0.11 $\mu$ s	$\alpha$ , no $\gamma$	-6.599	9/2-	
		214		$\approx 2$ $\mu$ s	$\alpha$	-3.399		
		215		0.10 ms	$\alpha$	-1.262	(9/2)-	
		216		0.30 ms	$\alpha$	2.237	1(-)	
		217		32.3 ms	$\alpha$ 99+%, $\beta^-$ 0.012%	4.362	(9/2-)	
		218		$\approx 2$ s	$\alpha$ 99.9%, $\beta^-$ 0.1%	6.099		
		219		0.9 m	$\alpha$ $\approx 97\%$ , $\beta^-$ $\approx 3\%$	10.53		
86	Rn	200		1 s	$\alpha$	-3.74 s	0+	
		201(g)		7.0 s	$\alpha$	-3.95 s		
		201(m)		3.8 s	$\alpha$			
		<262		<1 $\mu$ s	$\alpha$			
		202		9.9 s	$\alpha$ >70%	-5.06 s	0+	
		203		45 s	$\alpha$ 65%, EC+ $\beta^+$ 35%	-6.00 s		
		203m		26 s	$\alpha$	-6.95 s		
		204		75 s	$\alpha$ $\approx 72\%$ , EC+ $\beta^+$ $\approx 28\%$	-7.77 s	0+	
		205		170 s	EC+ $\beta^+$ 77%, $\alpha$ 23%	-7.60 s		
		206		5.7 m	$\alpha$ 64%, EC+ $\beta^+$ 36%	-8.97 s	0+	
		207		9.3 m	EC+ $\beta^+$ 77%, $\alpha$ 23%	-8.69	5/2-	
		208		24 m	$\alpha$ 52%, EC+ $\beta^+$ 48%	-9.56 s	0+	
		209		29 m	EC 80%, $\beta^-$ 3%, $\alpha$ 17%	-8.994	5/2-	
		210		2.4 h	$\alpha$ 96%, EC 4%	-9.606	0+	
		211		14.6 h	EC+ $\beta^+$ 74%, $\alpha$ 26%	-8.761	1/2-	
		212		23 m	$\alpha$	-8.666	0+	
		213		25.0 ms	$\alpha$	-5.706	(9/2+)	
		214		0.21 $\mu$ s	$\alpha$	-4.328	0+	
		215		2.3 $\mu$ s	$\alpha$ , no $\gamma$	-1.179	(9/2+)	
		216		45 $\mu$ s	$\alpha$	0.245	0+	
		217		0.54 ms	$\alpha$	3.649	9/2+	
		218		35 ms	$\alpha$	5.212	0+	
		219		3.96 s	$\alpha$	8.631	(5/2)+	
		220		55.6 s	$\alpha$	10.599	0+	
		221		25 m	$\beta^-$ $\approx 80\%$ , $\alpha$ $\approx 20\%$	14.38 s		<0.2 $^{10}$
		222		3.8235 d	$\beta^-$	16.370	0+	0.73 $^{10}$
		223		43 m	$\beta^-$			
		224		1.8 h	$\beta^-$	22.26 s	0+	
		225		4.5 m	$\beta^-$	27.59 s		
		226		6.0 m	$\beta^-$		0+	
87	Fr	203		0.7 s	$\alpha$ , $\beta^+$ +EC	1.23		
		204		2.1 s	$\alpha$	0.52 s		
		205		3.7 s	$\alpha$	-1.04 s		
		206		16.0 s	$\alpha$ 85%, EC+ $\beta^+$ 15%	-1.18 s		
		207		14.6 s	$\alpha$ 93%, EC+ $\beta^+$ 7%	-2.65 s	(9/2-)	
		208		56.0 s	$\alpha$ 74%, EC+ $\beta^+$ 26%	-2.77 s		
		209		50.0 s	$\alpha$ 89%, EC+ $\beta^+$ 11%	-3.76 s	9/2-	
		210		3.2 m	$\alpha$ , EC+ $\beta^+$	-3.64 s		
		211		3.1 m	$\alpha$ , EC+ $\beta^+$	-4.22		
		212		19.3 m	EC+ $\beta^+$ 56%, $\alpha$ 44%	-3.69 s		
		213		34.7 s	$\alpha$ 99.45%, EC 0.55%	-3.556	(9/2-)	
		214		5.0 ms	$\alpha$	-0.965	1(-)	
		214m		3.4 ms	$\alpha$	-0.843	9(-)	
		215		0.12 $\mu$ s	$\alpha$ , no $\gamma$	0.309	9/2-	
		216		0.70 $\mu$ s	$\alpha$ , no $\gamma$	2.975		
		217		22 $\mu$ s	$\alpha$ , no $\gamma$	4.307	9/2-	
		218		$\approx 0.7$ ms	$\alpha$	7.050		
		219		0.020 s	$\alpha$	8.617	(9/2)-	
		220		27.4 s	$\alpha$ 99.65%, $\beta^-$ 0.35%	11.470		
		221		4.8 m	$\alpha$	13.265	(5/2-)	
		222		14.4 m	$\beta^-$ 99+%, $\alpha$ 0.01-0.1%	16.338		
		223		21.6 m	$\beta^-$ 99+%, $\alpha$ $\approx 0.005\%$	18.382	(3/2)	
		224		2.7 m	$\beta^-$	21.71 s		
		225		3.9 m	$\beta^-$	23.79 s		
		226		481 s	$\beta^-$	27.46		

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	A(MeV)	J $\pi$	$\sigma_n(h)$
87	Fr	227	2.4 m	$\beta^-$	29.50		
		228	39 s	$\beta^-$			
		229	0.8 m	$\beta^-$			
88	Ra	226	0.4 s	$\alpha, (EC+\beta^+)^0$	5.96 s	0+	
		227	1.3 s	$\alpha, (EC+\beta^+)^0$	5.70 s		
		228	1.5 s	$\alpha$	1.93 s	0+	
		229	4.7 s	$\alpha$	1.97 s		
		230	3.7 s	$\alpha$	0.61 s	0+	
		231	14 s	$\alpha, (EC+\beta^+)^0$	0.78	(5/2-)	
		232	13.0 s	$\alpha, (EC+\beta^+)^0$	-0.11 s	0+	
		233	2.7 m	$\alpha$ 80%, EC + $\beta^+$ 20%	0.290	(1/2-)	
		213m	2.1 ms	$\beta^-$ 99%, $\alpha$ 1%	2.060	(17/2-, 13/2+)	
		214	2.46 s	$\alpha$ 99%, EC 0.059%	0.090	0+	
		215	1.6 ms	$\alpha$	2.531		
		216	0.18 $\mu$ s	$\alpha$	3.265	0+	
		217	1.6 $\mu$ s	$\alpha$	5.881		
		218	14 $\mu$ s	$\alpha$	6.644	0+	
		219	10 ms	$\alpha$	9.377		
		220	23 ms	$\alpha$	10.263	0+	
		221	30 s	$\alpha$	12.957		
		222	38 s	$\alpha$	14.312	0+	
		223	11.435 d	$\alpha$	17.235	1/2+	134 m
		224	3.66 d	$\alpha$	18.813	0+	12 m
		225	14.8 d	$\beta^-$	21.907	(3/2)+	
		226	1.60 $\times 10^3$ y	$\alpha$	23.666	0+	8
		227	42.2 m	$\beta^-$	27.185	(3/2)+	
		228	5.76 y	$\beta^-$	26.941	0+	36 m
		229	4.0 m	$\beta^-$	32.72 s		
		230	93 m	$\beta^-$	34.56 s	0+	
89	Ac	209	0.10 s	$\alpha$	9.12 s		
		210	0.35 s	$\alpha$	8.86 s		
		211	0.25 s	$\alpha, EC+\beta^+$	7.40 s		
		212	0.93 s	$\alpha$	7.18 s		
		213	0.80 s	$\alpha, no \gamma$	6.17 s	(9/2-)	
		214	6.2 s	$\alpha$ 86%, EC 14%	6.14 s		
		215	0.17 s	$\alpha$ 99.91%, EC + $\beta^+$ 0.09%	5.95		
		216	0.33 ms	$\alpha$	7.90 s		
		216m	0.33 ms	$\alpha$	8.02 s		
		217	0.11 $\mu$ s	$\alpha, no \gamma$	8.701	(9/2-)	
		218	0.27 $\mu$ s	$\alpha, no \gamma$	10.837		
		219	7 $\mu$ s	$\alpha, no \gamma$	11.560	(9/2-)	
		220	26 ms	$\alpha$	13.747		
		221	52 ms	$\alpha$	14.518		
		222	5 s	$\alpha$	16.617		
		222m	66 s	$\alpha$ 90%, $\beta^-$ <10%, EC 1%			
		223	2.2 m	$\alpha$ 99%, EC 1%	17.825	(5/2-)	
		224	2.3 h	EC 90%, $\alpha$ 10%	20.219		
		225	10.0 d	$\alpha$	21.626	(3/2-)	
		226	29 h	$\beta^-$ 83%, EC 17%, $\alpha$ 0.006%	24.301	(1-)	
		227	21.773 y	$\beta^-$ 96.62%, $\alpha$ 1.38%	25.850	3/2-	900 m
		228	6.13 h	$\beta^-$	26.095	(3+)	
		229	62.7 m	$\beta^-$	30.72	(3/2+)	
		230	122 s	$\beta^-$	33.76 s		
		231	7.5 m	$\beta^-$	35.91	(1/2+)	
		232	35 s	[ $\beta^-$ ]	39.15 s		
90	Th	215	1.2 s	$\alpha$	10.87	(1/2-)	
		216	0.020 s	$\alpha$	10.39 s	0+	
		217	0.25 ms	$\alpha$	12.141		
		218	0.10 $\mu$ s	$\alpha$	12.362	0+	
		219	1.05 $\mu$ s	$\alpha$	14.470		
		220	10 $\mu$ s	$\alpha$	14.663	0+	
		221	1.7 ms	$\alpha$	16.934		
		222	2.8 ms	$\alpha$	17.197	0+	
		223	0.66 s	$\alpha$	19.256		
		224	1.04 s	$\alpha$	19.993	0+	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta$ (MeV)	$J\pi$	$a_0(b)$
90	Th	230	8.0 m	$\alpha$ 90%, EC 10%	22.303	(3/2 <sup>+</sup> )	
		230	30.9 m	$\alpha$	23.189	0 <sup>+</sup>	
		232	18.710 d	$\alpha$	25.806	3/2 <sup>+</sup>	200 <sup>19</sup>
		230	1.9131 y	$\alpha$	26.750	0 <sup>+</sup>	100 <sup>19</sup>
		232	7.3 $\times 10^4$ y	$\alpha$	29.581	5/2 <sup>+</sup>	30 <sub>1</sub>
		234	8.3 $\times 10^4$ y	$\alpha$	30.061	0 <sup>+</sup>	40
		231	25.52 h	$\beta^-$	33.812	5/2 <sup>+</sup>	
		230	1028 <sup>19</sup>	$\alpha$	35.447	0 <sup>+</sup>	7, 4
		230	1.41 $\times 10^{10}$ y	$\alpha$			
		233	22.3 m	$\beta^-$	38.732	1/2 <sup>+</sup>	1.4 $\times 10^{13}$ M
		234	24.10 d	$\beta^-$	40.612	0 <sup>+</sup>	2.0
		236	6.9 m	$\beta^-$	44.15 s		
		236	37 m	$\beta^-$	46.64 s	0 <sup>+</sup>	
91	Pa	218	0.20 s	$\alpha$			
		217	10 ms	$\alpha$			
		222	5.7 ms	$\alpha$	21.959		
		223	5 ms	$\alpha$	22.330		
		224	0.9 s	$\alpha$	23.790		
		225	1.8 s	$\alpha$	24.320		
		226	1.8 m	$\alpha$ 74%, EC 26%	26.029		
		227	38.3 m	$\alpha$ 85%, EC 15%	26.032	(5/2 <sup>-</sup> )	
		228	22 h	EC 96%, $\alpha$ 4%	28.870	3 <sup>+</sup>	
		229	1.4 d	EC 99.75%, $\alpha$ 0.25%	29.087	(5/2 <sup>+</sup> )	
		230	17.7 d	EC 90%, $\beta^-$ 10%, $\alpha$ 0.0032%	32.166	(2 <sup>-</sup> )	1.5 $\times 10^{13}$ M
		231	3.28 $\times 10^4$ y	$\alpha$	33.423	3/2 <sup>-</sup>	800 <sup>19</sup>
		232	1.31 d	$\beta^-$	35.934	(2 <sup>-</sup> )	700 <sup>19</sup>
		233	27.0 d	$\beta^-$	37.487	3/2 <sup>-</sup>	20 <sub>m</sub>
		234	6.75 h	$\beta^-$	40.349	4(+)	19 <sub>g</sub>
		234m	1.175 m	$\beta^-$ 99.87%, IT 0.13%	40.43	(0 <sup>-</sup> )	<5 $\times 10^{13}$ M
		235	24.2 m	$\beta^-$	42.32	(3/2 <sup>-</sup> )	
		236	9.1 m	$\beta^-$	45.54	(1 <sup>-</sup> )	
		237	8.7 m	$\beta^-$	47.64	(1/2 <sup>+</sup> )	
		238	2.3 m	$\beta^-$	51.27	(3 <sup>-</sup> )	
92	U	226	0.5 s	$\alpha$	27.186	0 <sup>+</sup>	
		227	1.1 m	$\alpha$	28.86 s		
		228	9.1 m	$\alpha$ 295%, EC 65%	29.221	0 <sup>+</sup>	
		229	58 m	EC 90%, $\alpha$ 10%	31.201	(3/2 <sup>+</sup> )	
		230	20.8 d	$\alpha$	31.607	0 <sup>+</sup>	22 <sup>19</sup>
		231	4.2 d	EC 99+%, $\alpha$ 0.0055%	33.78	(5/2)	300 <sup>19</sup>
		232	72 y	$\alpha$	34.587	0 <sup>+</sup>	74
		233	1.582 $\times 10^5$ y	$\alpha$	36.915	5/2 <sup>+</sup>	76 <sub>1</sub>
		234	0.00548 <sup>19</sup>	$\alpha$	38.143	0 <sup>+</sup>	530 <sub>1</sub>
		234	2.45 $\times 10^5$ y	$\alpha$			46 <sub>1</sub>
		236	0.77028 <sup>19</sup>	$\alpha$	40.916	7/2 <sup>-</sup>	100 <sub>g-m</sub>
		236	7.038 $\times 10^8$ y	$\alpha$			580 <sub>1</sub>
		236m	26 m	IT	40.916	1/2 <sup>+</sup>	98
		236d	20 ns	SF			
		238	3.42 $\times 10^8$ y	$\alpha$	42.442	0 <sup>+</sup>	5, 1
		238d	0.12 $\mu$ s	SF	44.79		
		237	6.75 d	$\beta^-$	45.589	1/2 <sup>+</sup>	400
		238	99.7258 <sup>19</sup>	$\alpha$	47.307	0 <sup>+</sup>	2, 7
		238	4.468 $\times 10^8$ y	$\alpha$	48.866	(0 <sup>+</sup> )	
		238	0.19 $\mu$ s	IT 96%, SF 4%			
		239	23.5 m	$\beta^-$	50.572	5/2 <sup>+</sup>	22 <sup>19</sup>
		240	14.1 h	$\beta^-$	52.712	0 <sup>+</sup>	15 <sup>19</sup>
93	Np	239	4.0 m	$\alpha$ 250%, EC 50%	33.750		
		240	4.6 m	$\alpha$ 99+%, EC+ $\beta^-$ 0.97%	35.232		
		241	48.0 m	EC <99%, $\alpha$ >1%	35.626	(5/2)	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(\text{MeV})$	$J^\pi$	$\sigma_n(b)$
93	Np	232		14.7 m	EC	37.29 s		
		233		36.2 m	EC 99+%, $\alpha$ 0.001%	38.01 s	(5/2+)	
		234		4.4 d	EC 99.95%, $\beta^-$ 0.05%	38.951	(0+)	$1.0 \times 10^3$ p
		235		396 a	EC 99+%, $\alpha$ 0.0016%	41.040	5/2+	$160 \frac{11}{15}$ s
		236		$1.1 \times 10^5$ y	EC 91%, $\beta^-$ 9%		(6-)	$3 \times 10^4$ t
		236		22.5 h	EC 50%, $\beta^-$ 50%	43.426	1(-)	
		237		$2.14 \times 10^4$ y	$\alpha$	44.869	5/2+	180
		237f		45 ns	SF	47.57		
		238		2.117 d	$\beta^-$	47.453	2+	$2.1 \times 10^3$ F
		239		2.35 a	$\beta^-$	49.306	5/2+	$32 \frac{1}{2}$ m
		240		67 m	$\beta^-$	52.21	(5+)	$\approx 20$ s
		240m		7.5 ns	$\beta^-$ 99.99%, IT 0.11%		1(-)	
		241		16.0 m	$\beta^-$	54.31		
94	Pu	232		34 m	EC 280%, $\alpha$ 520%	38.362	0+	
		233		20.9 m	EC 99.85%, $\alpha$ 0.12%	40.042		
		234		8.8 h	EC 94%, $\alpha$ 6%	40.342	0+	
		235		25.6 m	EC 99+%, $\alpha$ 0.003%	42.16	(5/2+)	
		235f		30 ns	SF	43.86		
		236		2.85 y	$\alpha$	42.889	0+	150 p
		236f <sub>1</sub>		0.03 ns	SF			
		236f <sub>2</sub>		0.03 $\mu$ s	SF	46.39		
		237		45.4 d	EC 99+%, $\alpha$ 0.0033%	45.087	7/2-	$2.1 \times 10^3$ p
		237m		0.16 s	IT	45.233	1/2+	
		237f <sub>1</sub>		0.11 $\mu$ s	SF	47.39		
		237f <sub>2</sub>		1.1 $\mu$ s	SF	47.69		
		238		87.74 y	$\alpha$	46.161	0+	500 s
		238f <sub>1</sub>		0.6 ns	SF	48.56		17 p
		238f <sub>2</sub>		6 ns	SF	48.86		
		239		$2.41 \times 10^4$ y	$\alpha$	48.585	1/2+	742 t
		239f <sub>1</sub>		8 $\mu$ s	SF	50.79		271
		239f <sub>2</sub>		0.01 $\mu$ s?	SF			
		240		$6.57 \times 10^3$ y	$\alpha$	50.123	0+	290
		240f		3.8 ns	SF	52.52	(0+)	
		241		14.4 y	$\beta^-$ 98+%, $\alpha$ 0.0024%	52.953	5/2+	$1.01 \times 10^3$ t
		241f <sub>1</sub>		24 $\mu$ s	SF	54.95		370
		241f <sub>2</sub>		30 ns?	SF			
		242		$3.78 \times 10^5$ y	$\alpha$	54.715	0+	19
		242f <sub>1</sub>		4 ns	SF			<0.2 t
		242f <sub>2</sub>		28 ns	SF			
		243		4.956 h	$\beta^-$	57.752	7/2+	200 p
		243f		0.05 $\mu$ s	SF	58.55		100 m
		244		$8.1 \times 10^3$ y	$\alpha$	59.803	0+	1.7
		244f		0.4 ns	SF			
		245		10.5 h	$\beta^-$	63.157	(9/2-)	150
		246		10.85 d	$\beta^-$	65.29	0+	
95	Am	232		1.4 mf	[EC+ $\beta^+$ ], [EC+ $\beta^+$ ]SF			
		234		2.6 m	[EC+ $\beta^+$ ], [EC+ $\beta^+$ ]SF	44.46 s		
		236f		?	SF			
		238f		?	IT			
		237		1.22 h	EC 99+%, $\alpha$ 0.025%	46.64 s	5/2(-)	
		237f		5 ns	SF	48.74 s		
		238		1.63 h	EC 99+%, $\alpha$ $1.0 \times 10^{-6}$ %	48.417	1+	
		238f		35 $\mu$ s	IT	50.72		
		239		11.9 h	EC 99+%, $\alpha$ 0.010%	49.308	5/2-	
		240		0.16 $\mu$ s	SF	51.89		
96	Cm	240		50.0 h	EC 98+%, $\alpha$ $1.9 \times 10^{-4}$ %	51.443	(3-)	
		240f		0.9 ns	SF	54.04		

TABLE OF NUCLIDES

Z	EI	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	M(MV)	SE	$\sigma_n(b)$
95	Am	241		433 y	$\alpha$	52.932	5/2-	562 <sub>g</sub> 62 <sub>m</sub> 3.2 <sub>r</sub>
		241f		1.5 $\mu$ s	BF	55.13		
		242		16.01 h	$\beta^-$ 82.7%, EC 17.3%	55.463	1-	$2.1 \times 10^3$ $\mu$
		242m		152 y	IT 99.52%, $\alpha$ 0.48%	55.511	5-	$7.4 \times 10^3$ $\mu$
		242f		14.0 ms	SF	57.76		$1.6 \times 10^3$ $\mu$
		243		$7.37 \times 10^3$ y	$\alpha$	57.170	5/2-	80 <sub>m</sub> <sup>rs</sup> 6 <sub>rs</sub> 4
		243f		5 $\mu$ s	SF	59.17		
		244		10.1 h	$\beta^-$	59.077	(6-)	$2.2 \times 10^3$ $\mu$
		244m		26 m	$\beta^-$ 99+%, EC 0.036%	59.940	(1-)	$1.6 \times 10^3$ $\mu$
		244f		1.1 ms	SF	61.48		
		245		2.05 h	$\beta^-$	61.897	(5/2)+	
		245f		0.6 $\mu$ s	SF			
		246		39 m	$\beta^-$		(7 )	
		246f		25.0 ms	$\beta^-$	64.92	(2-)	
		246f		0.07 ms	SF			
		247		24 m	$\beta^-$	67.13 s	(5/2)	
96	Cm	239		2.3 h	EC <90%, $\alpha$ >10%	58.288	0+	
		239		2.9 h	EC	51.09 s		
		240		27 d	$\alpha$	51.712	0+	
		240f		10 $\mu$ s	SF			
		241		32.6 d	EC 99.0%, $\alpha$ 1.0%	51.833	1/2+	
		241f		15 ms	SF	56.70		
		242		162.8 d	$\alpha$	56.802	0+	20 <5 <sub>f</sub> <sup>rs</sup>
		242 <sub>1</sub>		0.04 ms	SF			
		242 <sub>2</sub>		0.2 $\mu$ s	SF	57.60		
		243		26.5 y	$\alpha$ 99.74%, EC 0.26%	57.177	5/2+	$1.0 \times 10^3$ $\mu$ 610 <sub>f</sub> 130
		243f		0.04 $\mu$ s	SF	58.66		
		244		18.11 y	$\alpha$	58.460	0+	14 1.0 <sub>f</sub>
		244(f <sub>1</sub> )		<5 $\mu$ s <sup>9</sup>	[SF]			
		244(f <sub>2</sub> )		>100 ms	SF	61.45		
		245		$8.5 \times 10^3$ y	$\alpha$	61.001	7/2+	$2.0 \times 10^3$ $\mu$ 350
		245f		13 ms	SF	62.70		
		246		$4.7 \times 10^3$ y	$\alpha$	62.615	0+	1.3 0.2 <sub>f</sub>
		247		$1.8 \times 10^2$ y	$\alpha$	65.530	9/2-	100 <sub>f</sub> 60
		248		$3.5 \times 10^3$ y	$\alpha$ 91.74%, SF 8.26%	67.389	0+	4 <sub>m</sub> 0.3 <sub>f</sub>
		249		85 m	$\beta^-$	70.740	1/2+	2 <sub>rs</sub>
		250		$61.1 \times 10^4$ y	SF	72.986	0+	ms0 <sup>rs</sup>
		251		16.6 m	$\beta^-$	76.67 s	(1/2+)	
97	Bk	240		5 m	EC+ $\beta^+$ , (EC+ $\beta^+$ )SF 0.001%	55.71 s		
		242		7 m	EC	57.80 s		
		242 <sub>1</sub>		0.6 $\mu$ s	SF			
		242 <sub>2</sub>		10 ms	SF			
		243		4.5 h	EC 99.85%, $\alpha$ 0.15%	58.685	(3/2-)	
		243f		5 ms	SF	60.88		
		244		4.4 h	EC 99+%, $\alpha$ 0.006%	60.646		
		244f		0.8 $\mu$ s	SF			
		245		4.80 d	EC 99.88%, $\alpha$ 0.12%	61.811	3/2-	
		245f		2 ms	SF			
		246		1.80 d	EC	64.02 s	(2-)	
		247		$1.4 \times 10^3$ y	$\alpha$	65.484	(3/2-)	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Nuclide	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$E$ (MeV)	$J\pi$	$\sigma_n(b)$
87	Bk	248		23.5 h	$\beta^-$ 70%, EC 30%	67.99 s	(1-)	
		248		>9 y		67.99 s	(6+)	
		249		0.08 y	$\beta^-$ 99+%, $\alpha$ 0.0015%	69.646	7/2+	$1.0 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		250		3.22 h	$\beta^-$	72.950	2-	$1.0 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		251		56 m	$\beta^-$	75.25 s	(3/2-)	
88	Cf	248		1.1 m	$\alpha$	58.03 s	0+	
		241		4 m	$\alpha$	59.19 s		
		242		3.5 m	$\alpha$	59.332	0+	
		243		11 m	[EC] $\approx 86\%$ , $\alpha \approx 14\%$	60.91 s		
		244		19 m	$\alpha$	61.465	0+	
		245		44 m	[EC] $\approx 70\%$ , $\alpha \approx 30\%$	63.377		
		246		35.7 h	$\alpha$	64.096	0+	
		246f		0.05 $\mu$ s				
		247		3.15 h	EC 99.96%, $\alpha$ 0.04%	66.15 s	(7/2+)	
		248		333 d	$\alpha$	67.243	0+	
		249		351 y	$\alpha$	69.722	9/2-	$1.63 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		250		13.1 y	$\alpha$	71.170	0+	$2.0 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		251		$9.0 \times 10^2$ y	$\alpha$	74.127	1/2+	$4 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		252		2.64 y	$\alpha$ 96.91%, SF 3.09%	76.031	0+	$32 \text{ } ^{235}\text{U}$
		253		17.8 d	$\beta^-$ 99.69%, $\alpha$ 0.31%	79.299	(7/2+)	$1.3 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		254		60.5 d	SF 99.69%, $\alpha$ 0.31%	81.342	0+	$100 \text{ } ^{235}\text{U}$
		256		$\approx 2$ h <sup>9</sup>	[ $\beta^-$ ]		0+	
		256		12 m	SF			
89	Es	243		21 s	$\alpha$	64.80 s		
		244		37 s	EC+ $\beta^-$ 96%, $\alpha$ 4%	65.97 s		
		245		1.3 m	EC 60%, $\alpha$ 40%	66.38 s		
		246		7.7 m	EC+ $\beta^-$ 90%, $\alpha$ 10%	67.93 s		
		247		4.7 m	EC $\approx 93\%$ , $\alpha \approx 7\%$	68.550		
		248		28 m	EC $\approx 99.7\%$ , $\alpha \approx 0.3\%$	70.22 s		
		249		1.70 h	EC 99.4%, $\alpha$ 0.6%	71.116	(7/2+)	
		250		6.6 h	EC	73.17 s	(6+)	
		250		2.1 h	EC	73.17 s	(1-)	
		251		33 h	EC 99.5%, $\alpha$ 0.5%	74.507	(3/2-)	
		252		472 d	$\alpha$ 78%, EC 22%	77.15 s	(5-)	
		253		20.47 d	$\alpha$	79.012	7/2+	$160 \text{ } ^{235}\text{U}$
		254		276 d	$\alpha$	81.992	(7+)	$<3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		254m		39.3 h	$\beta^-$ $\approx 59\%$ , $\alpha$ 0.33%, EC 0.08%	82.070	2+	$2.8 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$
		256		38.3 d	$\beta^-$ 92.0%, $\alpha$ 0.0%, SF 0.004%	84.12 s	(7/2+)	$65 \text{ } ^{235}\text{U}$
		256		7.6 h	$\beta^-$	87.26 s	(7,8)	
		256		22 m	$\beta^-$	87.26 s		
100	Fm	242		0.8 ms <sup>9</sup>	SF		0+	
		244		3.3 ms	SF	68.77 s	0+	
		245		4 s	$\alpha$	70.02 s		
		246		1.2 s	$\alpha$ 92%, SF 8%	70.131	0+	
		247		9 s	$\alpha$	71.54 s		
		247		35 s	$\alpha$ $\approx 50\%$ , EC $\approx 50\%$	71.54 s		
		248		36 s	$\alpha$ 99.9%, SF 0.1%	71.691	0+	
		249		3 m	$\alpha$	73.50 s		
		250		30 m	$\alpha$ , EC <sup>7</sup>	74.069	0+	
		250m		1.8 s	IT			
		251		5.3 h	EC 98.2%, $\alpha$ 1.8%	76.00 s	(9/2-)	
		252		25.4 h	$\alpha$	76.822	0+	
		253		3.0 d	EC 88%, $\alpha$ 12%	79.346	1/2+	
		254		3.240 h	$\alpha$ 99+%, SF 0.0590%	80.899	0+	
		256		10.1 h	$\alpha$	83.793	7/2+	$3.3 \times 10^3 \text{ } ^{235}\text{U}$

TABLE OF NUCLIDES

Z	Nuclide El A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	$\Delta(McV)$	$J^\pi$	$\sigma_a(b)$
100	Fm 256	2.63 h	SF 91.9%, $\alpha$ 8.1%	85.481	0+	
	257	100.5 d	$\alpha$ 99.78%, SF 0.21%	88.588	(9/2+)	$6 \times 10^3 \%$ $3.0 \times 10^3 \%$
	258	0.4 ms	SF		0+	
	259	1.5 s	SF			
101	Md 248	7 s	EC+ $\beta^+$ 80%, $\alpha$ 20%	77.00 s		
	249	24 s	EC+ $\beta^+$ 580%, $\alpha$ <20%	77.76 s		
	250	0.9 m	EC+ $\beta^+$ 94%, $\alpha$ 6%	78.60 s		
	251	4.0 m	EC 290%, $\alpha$ 10%	79.03 s		
	252	2 m	EC+ $\beta^+$	80.50 s		
	254	10 m	EC	83.39 s		
	254	28 m	EC	83.39 s		
	256	27 m	EC 92%, $\alpha$ 8%	84.843	(7/2-)	
	256	75 m	EC 90.1%, $\alpha$ 9.9%	87.42 s		
	257	5.0 h	EC 90%, $\alpha$ 10%	89.04 s	(7/2-)	
	258	56 d	$\alpha$	91.82 s		
	258	43 h	EC(?)	91.82 s		
	259	1.6 h	SF			
102	No 250	0.25 ms <sup>a</sup>	SF		0+	
	251	0.8 s	$\alpha$			
	252	2.3 s	$\alpha$ 73%, SF 27%	82.867	0+	
	253	1.7 m	$\alpha$	84.33 s		
	254	55 s	$\alpha$	84.729	0+	
	254m	0.28 s	IT			
	255	3.1 m	$\alpha$ 62%, EC 38%	86.87 s	(1/2+)	
	256	3.2 s	$\alpha$ 99.7%, SF 0.3%	87.801	0+	
	257	26 s	$\alpha$	90.223		
	258	1.2 ms	SF	91.52 s	0+	
	259	58 m	$\alpha$ 78%, EC 22%	94.012		
103	Lr 256	22 s	$\alpha$	90.25 s		
	256	27 s	$\alpha$	91.82 s		
	257	0.85 s	$\alpha$	92.97 s		
	258	4.3 s	$\alpha$	94.82 s		
	259	9 s	$\alpha$	95.97 s		
	260	3.0 m	$\alpha$	98.14 s		
104	253	1.6 s <sup>b</sup>	SF 50% <sup>(?)</sup>			
	254	0.5 ms <sup>a</sup>	SF		0+	
	255	2 s <sup>b</sup>	SF 50%			
	256	~5 ms <sup>a</sup>	SF		0+	
	257	5 s	$\alpha$	95.95 s		
	258	11 ms <sup>a</sup>	SF	96.55 s	0+	
	259	3 s	$\alpha$	98.50 s		
	260	0.08 s <sup>b</sup>	SF	99.23 s	0+	
	261	1.1 m	$\alpha$	101.25 s		
105	255	~1.2 s <sup>b</sup>	SF 20%			
	257	5 s <sup>b</sup>	SF 20%			
	260	1.5 s	$\alpha$ 90%, SF 10%	103.65 s		
	261	2 s	$\alpha$ 75%, SF 25%	104.46 s		
	262	0.7 m	$\alpha$ 40%	106.04 s		
			SF or EC(?) 60%			
106	259	4 to 10 ms <sup>a</sup>	SF 70% <sup>(?)</sup>			
	263	0.9 s	$\alpha$			
107	261	1 to 2 ms <sup>a</sup>	SF 20%			

## APPENDIX N

## Chart of the Nuclides

On the following pages the *Karlsruher Nuklidkarte* (by W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig and H. Münzel) is reproduced by the kind permission of Prof. Seelmann-Eggebert. The chart shows  $Z$  on the ordinate and  $N$  on the abscissa. The axes are thus interchanged when compared with Fig. 3.1 (but same as for Fig. 3.8). In the original chart colors are used to make it easy to distinguish between different decay modes.

The following abbreviations and symbols are used:

μs, ms, s	Mikrosekunde, Millisekunde, Sekunde microsecond, millisecond, second
min, h, d, o	Minute, Stunde, Tag, Jahr minute, hour, day, year
β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup> -Zerfall β <sup>-</sup> decay
β <sup>+</sup>	β <sup>+</sup> -Zerfall β <sup>+</sup> decay
α	α-Zerfall α decay
γ	γ-Strahlung γ radiation
EC	Electron Capture electron capture
β <sup>-</sup> EC	β <sup>-</sup> decay with Electron Capture β <sup>-</sup> decay with electron capture
β <sup>+</sup> EC	β <sup>+</sup> decay with Electron Capture β <sup>+</sup> decay with electron capture

μs, s	Nuklid zerfällt in der angegebenen Zeitdauer und/oder Grundzustand des Tochterkerns nucleus decays in the mentioned and/or ground state of the daughter nucleus
05, 0	Spalte und (n, p)-Zerfall Spalte und (n, p)-Zerfall Spalte und (n, p)-Zerfall Spalte und (n, p)-Zerfall

## Element

Cd	symbol of the element
112.40	atomic weight
± 2480	absorption cross section for thermal neutrons (b)

## Unstable Nuclides

Ge 81 10.1 s	symbol of the element, number of nucleons
β <sup>-</sup> - 5.3, - 5.6 γ 120, 100	β <sup>-</sup> - 5.3, - 5.6 γ 120, 100
0.21	energy yield for <sup>228</sup> Ac decay with thermal neutrons (b)

## Stable Nuclides

Ge 81 10.1 s	symbol of the element, number of nucleons
β <sup>-</sup> - 5.3, - 5.6 γ 120, 100	atomic abundance (atom %)
0.21	β <sup>-</sup> - 5.3, - 5.6 γ 120, 100

Sr 85 67.3 s	symbol of the element, number of nucleons
β <sup>-</sup> 232 γ 101	β <sup>-</sup> 232 γ 101
67.3 s	left hand side: metastable state right hand side: ground state

## Stable with Metastable State

Sr 85 67.3 s	left part: metastable state right part: ground state
β <sup>-</sup> 232	energy of the isomeric transition (keV)
67.3 s	β <sup>-</sup> - 5.3, - 5.6 γ 120, 100

Am 240 50.8 h	left hand side: spontaneous fission right hand side: decay data of the ground state "f" indicates that the daughter <sup>240</sup> Am is fission in at least 99.5% and 240-241 Am: heat 5.5
50.8 h	50.8 h

## Primordial Nuclides

Am 240 50.8 h	symbol of the element, number of nucleons
50.8 h	isotopic abundance (atom %)





**KARLSRUHER NUKLIDKARTE**

5. Auflage 1974

CHART OF THE NUCLIDES - TABLEAU DES NUCLÉIDES - TABLA DE NUCLEOS

W. Seelmann-Eggert G. Pfennig, H. Münzel

Kernforschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Radiochemie

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

**Alle Rechte vorbehalten - All rights reserved**

Zu beziehen von:  
For sale by:  
En vente chez:

Gertbech u. Sohn Verlag  
8 München 34, Barer Str. 32  
ISBN 3 87253 084 4

Gedruckt von:  
Ernst Klart Druckerei  
7 Stuttgart 1

**Ernst Klett Dr.  
7 Stuttgart?**

# KARLSRUHER NUKLIDKARTE

4. Auflage 1974

CHART OF THE NUCLIDES - TABLEAU DES NUCLEIDES - TABLA DE NUCLEIDOS

W. Seelmann-Eggbert, G. Pfennig, H. Münzel

Kernforschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Radiochemie

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Alle Rechte vorbehalten - All rights reserved

Tous droits réservés - todos los derechos están reservados

Zu beziehen von:

Gebrecht u. Sohn Verlag

8 München 34, Bismarckstr. 32

Für sale by:

ISBN 3 87283 064 4

En vente chez:

Puede adquirirse en:

Gedruckt von:

Ernst Klett Druckerei

7 Stuttgart 1

Printed by:

Imprimé par:

Impreso por:

18

17

16

15

14

13

12

11

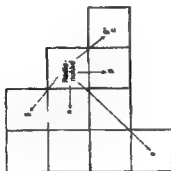
10

9

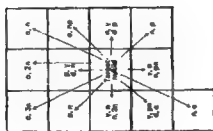
Ar 39 51.966 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 40 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 41 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 42 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 43 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 44 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 45 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 46 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 47 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 48 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 49 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 50 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 51 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 52 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 53 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 54 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 55 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 56 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 57 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 58 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 59 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 60 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 61 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 62 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 63 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 64 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 65 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 66 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 67 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 68 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 69 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 70 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 71 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 72 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 73 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 74 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 75 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 76 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 77 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 78 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 79 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 80 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 81 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 82 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 83 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 84 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 85 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 86 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 87 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 88 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 89 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 90 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 91 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 92 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 93 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 94 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 95 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 96 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 97 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 98 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 99 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 100 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 101 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 102 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 103 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 104 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 105 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 106 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 107 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 108 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 109 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 110 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 111 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 112 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 113 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 114 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 115 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 116 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 117 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 118 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 119 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 120 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 121 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 122 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 123 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 124 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 125 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 126 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 127 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 128 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 129 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 130 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 131 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 132 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 133 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 134 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 135 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 136 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 137 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 138 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 139 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 140 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 141 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 142 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 143 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 144 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 145 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 146 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 147 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 148 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 149 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 150 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 151 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 152 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 153 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 154 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 155 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 156 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 157 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 158 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 159 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 160 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 161 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 162 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 163 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 164 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 165 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 166 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 167 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 168 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 169 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 170 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 171 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 172 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 173 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 174 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 175 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 176 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 177 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 178 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 179 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 180 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 181 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 182 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 183 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 184 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 185 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 186 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 187 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 188 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 189 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 190 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 191 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 192 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 193 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 194 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 195 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 196 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 197 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 198 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 199 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 200 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 201 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 202 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 203 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 204 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 205 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 206 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 207 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 208 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 209 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 210 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 211 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 212 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 213 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 214 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 215 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 216 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 217 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 218 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 219 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 220 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 221 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 222 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 223 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 224 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 225 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 226 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 227 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 228 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 229 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 230 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 231 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 232 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 233 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 234 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 235 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 236 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 237 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 238 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 239 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 240 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 241 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 242 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 243 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 244 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 245 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 246 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 247 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 248 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 249 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 250 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 251 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 252 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 253 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 254 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 255 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 256 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 257 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 258 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 259 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 260 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 261 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 262 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 263 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 264 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 265 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 266 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 267 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 268 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 269 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 270 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 271 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 272 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 273 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 274 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 275 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 276 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 277 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 278 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 279 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 280 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 281 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 282 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 283 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 284 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 285 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 286 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 287 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 288 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 289 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 290 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 291 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 292 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 293 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 294 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 295 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 296 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 297 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 298 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 299 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 300 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 301 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 302 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 303 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 304 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 305 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 306 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 307 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 308 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 309 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 310 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 311 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 312 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 313 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 314 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 315 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 316 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 317 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 318 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 319 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 320 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 321 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 322 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 323 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 324 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 325 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 326 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 327 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 328 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 329 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 330 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 331 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 332 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 333 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 334 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 335 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 336 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 337 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 338 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 339 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 340 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 341 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 342 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 343 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 344 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 345 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 346 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 347 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 348 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 349 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 350 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 351 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 352 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 353 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m	Ar 354 39.962 m P 5.5 m P 5.5 m
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



RADIOACTIVE DECAY



NUCLEAR REACTIONS



RADIOACTIVE DECAY

NUCLEAR REACTIONS

The diagram illustrates a grid of squares representing different isotopes. Arrows indicate the decay paths of these isotopes, all converging towards a central square labeled "stable". The arrows originate from various squares, some labeled with numbers like 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100.

Ge 66 72.59 1.27-07	Ge 63 72.64 1.27-07	Ge 62 72.64 1.27-07	Ge 61 72.64 1.27-07	Ge 60 72.64 1.27-07	Ge 59 72.64 1.27-07	Ge 58 72.64 1.27-07	Ge 57 72.64 1.27-07	Ge 56 72.64 1.27-07	Ge 55 72.64 1.27-07	Ge 54 72.64 1.27-07	Ge 53 72.64 1.27-07	Ge 52 72.64 1.27-07	Ge 51 72.64 1.27-07	Ge 50 72.64 1.27-07	Ge 49 72.64 1.27-07	Ge 48 72.64 1.27-07	Ge 47 72.64 1.27-07	Ge 46 72.64 1.27-07	Ge 45 72.64 1.27-07	Ge 44 72.64 1.27-07	Ge 43 72.64 1.27-07	Ge 42 72.64 1.27-07	Ge 41 72.64 1.27-07	Ge 40 72.64 1.27-07	Ge 39 72.64 1.27-07	Ge 38 72.64 1.27-07	Ge 37 72.64 1.27-07	Ge 36 72.64 1.27-07	Ge 35 72.64 1.27-07	Ge 34 72.64 1.27-07	Ge 33 72.64 1.27-07	Ge 32 72.64 1.27-07	Ge 31 72.64 1.27-07	Ge 30 72.64 1.27-07	Ge 29 72.64 1.27-07	Ge 28 72.64 1.27-07	Ge 27 72.64 1.27-07	Ge 26 72.64 1.27-07	Ge 25 72.64 1.27-07	Ge 24 72.64 1.27-07	Ge 23 72.64 1.27-07	Ge 22 72.64 1.27-07	Ge 21 72.64 1.27-07	Ge 20 72.64 1.27-07	Ge 19 72.64 1.27-07	Ge 18 72.64 1.27-07	Ge 17 72.64 1.27-07	Ge 16 72.64 1.27-07	Ge 15 72.64 1.27-07	Ge 14 72.64 1.27-07	Ge 13 72.64 1.27-07	Ge 12 72.64 1.27-07	Ge 11 72.64 1.27-07	Ge 10 72.64 1.27-07	Ge 9 72.64 1.27-07	Ge 8 72.64 1.27-07	Ge 7 72.64 1.27-07	Ge 6 72.64 1.27-07	Ge 5 72.64 1.27-07	Ge 4 72.64 1.27-07	Ge 3 72.64 1.27-07	Ge 2 72.64 1.27-07	Ge 1 72.64 1.27-07	Ge 0 72.64 1.27-07	Ge -1 72.64 1.27-07	Ge -2 72.64 1.27-07	Ge -3 72.64 1.27-07	Ge -4 72.64 1.27-07	Ge -5 72.64 1.27-07	Ge -6 72.64 1.27-07	Ge -7 72.64 1.27-07	Ge -8 72.64 1.27-07	Ge -9 72.64 1.27-07	Ge -10 72.64 1.27-07	Ge -11 72.64 1.27-07	Ge -12 72.64 1.27-07	Ge -13 72.64 1.27-07	Ge -14 72.64 1.27-07	Ge -15 72.64 1.27-07	Ge -16 72.64 1.27-07	Ge -17 72.64 1.27-07	Ge -18 72.64 1.27-07	Ge -19 72.64 1.27-07	Ge -20 72.64 1.27-07	Ge -21 72.64 1.27-07	Ge -22 72.64 1.27-07	Ge -23 72.64 1.27-07	Ge -24 72.64 1.27-07	Ge -25 72.64 1.27-07	Ge -26 72.64 1.27-07	Ge -27 72.64 1.27-07	Ge -28 72.64 1.27-07	Ge -29 72.64 1.27-07	Ge -30 72.64 1.27-07	Ge -31 72.64 1.27-07	Ge -32 72.64 1.27-07	Ge -33 72.64 1.27-07	Ge -34 72.64 1.27-07	Ge -35 72.64 1.27-07	Ge -36 72.64 1.27-07	Ge -37 72.64 1.27-07	Ge -38 72.64 1.27-07	Ge -39 72.64 1.27-07	Ge -40 72.64 1.27-07	Ge -41 72.64 1.27-07	Ge -42 72.64 1.27-07	Ge -43 72.64 1.27-07	Ge -44 72.64 1.27-07	Ge -45 72.64 1.27-07	Ge -46 72.64 1.27-07	Ge -47 72.64 1.27-07	Ge -48 72.64 1.27-07	Ge -49 72.64 1.27-07	Ge -50 72.64 1.27-07	Ge -51 72.64 1.27-07	Ge -52 72.64 1.27-07	Ge -53 72.64 1.27-07	Ge -54 72.64 1.27-07	Ge -55 72.64 1.27-07	Ge -56 72.64 1.27-07	Ge -57 72.64 1.27-07	Ge -58 72.64 1.27-07	Ge -59 72.64 1.27-07	Ge -60 72.64 1.27-07	Ge -61 72.64 1.27-07	Ge -62 72.64 1.27-07	Ge -63 72.64 1.27-07	Ge -64 72.64 1.27-07	Ge -65 72.64 1.27-07	Ge -66 72.64 1.27-07	Ge -67 72.64 1.27-07	Ge -68 72.64 1.27-07	Ge -69 72.64 1.27-07	Ge -70 72.64 1.27-07	Ge -71 72.64 1.27-07	Ge -72 72.64 1.27-07	Ge -73 72.64 1.27-07	Ge -74 72.64 1.27-07	Ge -75 72.64 1.27-07	Ge -76 72.64 1.27-07	Ge -77 72.64 1.27-07	Ge -78 72.64 1.27-07	Ge -79 72.64 1.27-07	Ge -80 72.64 1.27-07	Ge -81 72.64 1.27-07	Ge -82 72.64 1.27-07	Ge -83 72.64 1.27-07	Ge -84 72.64 1.27-07	Ge -85 72.64 1.27-07	Ge -86 72.64 1.27-07	Ge -87 72.64 1.27-07	Ge -88 72.64 1.27-07	Ge -89 72.64 1.27-07	Ge -90 72.64 1.27-07	Ge -91 72.64 1.27-07	Ge -92 72.64 1.27-07	Ge -93 72.64 1.27-07	Ge -94 72.64 1.27-07	Ge -95 72.64 1.27-07	Ge -96 72.64 1.27-07	Ge -97 72.64 1.27-07	Ge -98 72.64 1.27-07	Ge -99 72.64 1.27-07	Ge -100 72.64 1.27-07	Ge -101 72.64 1.27-07	Ge -102 72.64 1.27-07	Ge -103 72.64 1.27-07	Ge -104 72.64 1.27-07	Ge -105 72.64 1.27-07	Ge -106 72.64 1.27-07	Ge -107 72.64 1.27-07	Ge -108 72.64 1.27-07	Ge -109 72.64 1.27-07	Ge -110 72.64 1.27-07	Ge -111 72.64 1.27-07	Ge -112 72.64 1.27-07	Ge -113 72.64 1.27-07	Ge -114 72.64 1.27-07	Ge -115 72.64 1.27-07	Ge -116 72.64 1.27-07	Ge -117 72.64 1.27-07	Ge -118 72.64 1.27-07	Ge -119 72.64 1.27-07	Ge -120 72.64 1.27-07	Ge -121 72.64 1.27-07	Ge -122 72.64 1.27-07	Ge -123 72.64 1.27-07	Ge -124 72.64 1.27-07	Ge -125 72.64 1.27-07	Ge -126 72.64 1.27-07	Ge -127 72.64 1.27-07	Ge -128 72.64 1.27-07	Ge -129 72.64 1.27-07	Ge -130 72.64 1.27-07	Ge -131 72.64 1.27-07	Ge -132 72.64 1.27-07	Ge -133 72.64 1.27-07	Ge -134 72.64 1.27-07	Ge -135 72.64 1.27-07	Ge -136 72.64 1.27-07	Ge -137 72.64 1.27-07	Ge -138 72.64 1.27-07	Ge -139 72.64 1.27-07	Ge -140 72.64 1.27-07	Ge -141 72.64 1.27-07	Ge -142 72.64 1.27-07	Ge -143 72.64 1.27-07	Ge -144 72.64 1.27-07	Ge -145 72.64 1.27-07	Ge -146 72.64 1.27-07	Ge -147 72.64 1.27-07	Ge -148 72.64 1.27-07	Ge -149 72.64 1.27-07	Ge -150 72.64 1.27-07	Ge -151 72.64 1.27-07	Ge -152 72.64 1.27-07	Ge -153 72.64 1.27-07	Ge -154 72.64 1.27-07	Ge -155 72.64 1.27-07	Ge -156 72.64 1.27-07	Ge -157 72.64 1.27-07	Ge -158 72.64 1.27-07	Ge -159 72.64 1.27-07	Ge -160 72.64 1.27-07	Ge -161 72.64 1.27-07	Ge -162 72.64 1.27-07	Ge -163 72.64 1.27-07	Ge -164 72.64 1.27-07	Ge -165 72.64 1.27-07	Ge -166 72.64 1.27-07	Ge -167 72.64 1.27-07	Ge -168 72.64 1.27-07	Ge -169 72.64 1.27-07	Ge -170 72.64 1.27-07	Ge -171 72.64 1.27-07	Ge -172 72.64 1.27-07	Ge -173 72.64 1.27-07	Ge -174 72.64 1.27-07	Ge -175 72.64 1.27-07	Ge -176 72.64 1.27-07	Ge -177 72.64 1.27-07	Ge -178 72.64 1.27-07	Ge -179 72.64 1.27-07	Ge -180 72.64 1.27-07	Ge -181 72.64 1.27-07	Ge -182 72.64 1.27-07	Ge -183 72.64 1.27-07	Ge -184 72.64 1.27-07	Ge -185 72.64 1.27-07	Ge -186 72.64 1.27-07	Ge -187 72.64 1.27-07	Ge -188 72.64 1.27-07	Ge -189 72.64 1.27-07	Ge -190 72.64 1.27-07	Ge -191 72.64 1.27-07	Ge -192 72.64 1.27-07	Ge -193 72.64 1.27-07	Ge -194 72.64 1.27-07	Ge -195 72.64 1.27-07	Ge -196 72.64 1.27-07	Ge -197 72.64 1.27-07	Ge -198 72.64 1.27-07	Ge -199 72.64 1.27-07	Ge -200 72.64 1.27-07	Ge -201 72.64 1.27-07	Ge -202 72.64 1.27-07	Ge -203 72.64 1.27-07	Ge -204 72.64 1.27-07	Ge -205 72.64 1.27-07	Ge -206 72.64 1.27-07	Ge -207 72.64 1.27-07	Ge -208 72.64 1.27-07	Ge -209 72.64 1.27-07	Ge -210 72.64 1.27-07	Ge -211 72.64 1.27-07	Ge -212 72.64 1.27-07	Ge -213 72.64 1.27-07	Ge -214 72.64 1.27-07	Ge -215 72.64 1.27-07	Ge -216 72.64 1.27-07	Ge -217 72.64 1.27-07	Ge -218 72.64 1.27-07	Ge -219 72.64 1.27-07	Ge -220 72.64 1.27-07	Ge -221 72.64 1.27-07	Ge -222 72.64 1.27-07	Ge -223 72.64 1.27-07	Ge -224 72.64 1.27-07	Ge -225 72.64 1.27-07	Ge -226 72.64 1.27-07	Ge -227 72.64 1.27-07	Ge -228 72.64 1.27-07	Ge -229 72.64 1.27-07	Ge -230 72.64 1.27-07	Ge -231 72.64 1.27-07	Ge -232 72.64 1.27-07	Ge -233 72.64 1.27-07	Ge -234 72.64 1.27-07	Ge -235 72.64 1.27-07	Ge -236 72.64 1.27-07	Ge -237 72.64 1.27-07	Ge -238 72.64 1.27-07	Ge -239 72.64 1.27-07	Ge -240 72.64 1.27-07	Ge -241 72.64 1.27-07	Ge -242 72.64 1.27-07	Ge -243 72.64 1.27-07	Ge -244 72.64 1.27-07	Ge -245 72.64 1.27-07	Ge -246 72.64 1.27-07	Ge -247 72.64 1.27-07	Ge -248 72.64 1.27-07	Ge -249 72.64 1.27-07	Ge -250 72.64 1.27-07	Ge -251 72.64 1.27-07	Ge -252 72.64 1.27-07	Ge -253 72.64 1.27-07	Ge -254 72.64 1.27-07	Ge -255 72.64 1.27-07	Ge -256 72.64 1.27-07	Ge -257 72.64 1.27-07	Ge -258 72.64 1.27-07	Ge -259 72.64 1.27-07	Ge -260 72.64 1.27-07	Ge -261 72.64 1.27-07	Ge -262 72.64 1.27-07	Ge -263 72.64 1.27-07	Ge -264 72.64 1.27-07	Ge -265 72.64 1.27-07	Ge -266 72.64 1.27-07	Ge -267 72.64 1.27-07	Ge -268 72.64 1.27-07	Ge -269 72.64 1.27-07	Ge -270 72.64 1.27-07	Ge -271 72.64 1.27-07	Ge -272 72.64 1.27-07	Ge -273 72.64 1.27-07	Ge -274 72.64 1.27-07	Ge -275 72.64 1.27-07	Ge -276 72.64 1.27-07	Ge -277 72.64 1.27-07	Ge -278 72.64 1.27-07	Ge -279 72.64 1.27-07	Ge -280 72.64 1.27-07	Ge -281 72.64 1.27-07	Ge -282 72.64 1.27-07	Ge -283 72.64 1.27-07	Ge -284 72.64 1.27-07	Ge -285 72.64 1.27-07	Ge -286 72.64 1.27-07	Ge -287 72.64 1.27-07	Ge -288 72.64 1.27-07	Ge -289 72.64 1.27-07	Ge -290 72.64 1.27-07	Ge -291 72.64 1.27-07	Ge -292 72.64 1.27-07	Ge -293 72.64 1.27-07	Ge -294 72.64 1.27-07	Ge -295 72.64 1.27-07	Ge -296 72.64 1.27-07	Ge -297 72.64 1.27-07	Ge -298 72.64 1.27-07	Ge -299 72.64 1.27-07	Ge -300 72.64 1.27-07	Ge -301 72.64 1.27-07	Ge -302 72.64 1.27-07	Ge -303 72.64 1.27-07	Ge -304 72.64 1.27-07	Ge -305 72.64 1.27-07	Ge -306 72.64 1.27-07	Ge -307 72.64 1.27-07	Ge -308 72.64 1.27-07	Ge -309 72.64 1.27-07	Ge -310 72.64 1.27-07	Ge -311 72.64 1.27-07	Ge -312 72.64 1.27-07	Ge -313 72.64 1.27-07	Ge -314 72.64 1.27-07	Ge -315 72.64 1.27-07	Ge -316 72.64 1.27-07	Ge -317 72.64 1.27-07	Ge -318 72.64 1.27-07	Ge -319 72.64 1.27-07	Ge -320 72.64 1.27-07	Ge -321 72.64 1.27-07	Ge -322 72.64 1.27-07	Ge -323 72.64 1.27-07	Ge -324 72.64 1.27-07	Ge -325 72.64 1.27-07	Ge -326 72.64 1.27-07	Ge -327 72.64 1.27-07	Ge -328 72.64 1.27-07	Ge -329 72.64 1.27-07	Ge -330 72.64 1.27-07	Ge -331 72.64 1.27-07	Ge -332 72.64 1.27-07	Ge -333 72.64 1.27-07	Ge -334 72.64 1.27-07	Ge -335 72.64 1.27-07	Ge -336 72.64 1.27-07	Ge -337 72.64 1.27-07	Ge -338 72.64 1.27-07	Ge -339 72.64 1.27-07	Ge -340 72.64 1.27-07	Ge -341 72.64 1.27-07	Ge -342 72.64 1.27-07	Ge -343 72.64 1.27-07	Ge -344 72.64 1.27-07	Ge -345 72.64 1.27-07	Ge -346 72.64 1.27-07	Ge -347 72.64 1.27-07	Ge -348 72.64 1.27-07	Ge -349 72.64 1.27-07	Ge -350 72.64 1.27-07	Ge -351 72.64 1.27-07	Ge -352 72.64 1.27-07	Ge -353 72.64 1.27-07	Ge -354 72.64 1.27-07	Ge -355 72.64 1.27-07	Ge -356 72.64 1.27-07	Ge -357 72.64 1.27-07	Ge -358 72.64 1.27-07	Ge -359 72.64 1.27-07	Ge -360 72.64 1.27-07	Ge -361 72.64 1.27-07	Ge -362 72.64 1.27-07	Ge -363 72.64 1.27-07	Ge -364 72.64 1.27-07	Ge -365 72.64 1.27-07	Ge -366 72.64 1.27-07	Ge -367 72.64 1.27-07	Ge -368 72.64 1.27-07	Ge -369 72.64 1.27-07	Ge -370 72.64 1.27-07	Ge -371 72.64 1.27-07	Ge -372 72.64 1.27-07	Ge -373 72.64 1.27-07	Ge -374 72.64 1.27-07	Ge -375 72.64 1.27-07	Ge -376 72.64 1.27-07	Ge -377 72.64 1.27-07	Ge -378 72.64 1.27-07	Ge -379 72.64 1.27-07	Ge -380 72.64 1.27-07	Ge -381 72.64 1.27-07	Ge -382 72.64 1.27-07	Ge -383 72.64 1.27-07	Ge -384 72.64 1.27-07	Ge -385 72.64 1.27-07	Ge -386 72.64 1.27-07	Ge -387 72.64 1.27-07	Ge -388 72.64 1.27-07	Ge -389 72.64 1.27-07	Ge -390 72.64 1.27-07	Ge -391 72.64 1.27-07	Ge -392 72.64 1.27-07	Ge -393 72.64 1.27-07	Ge -394 72.64 1.27-07	Ge -395 72.
---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	----------------

34	Sn 72.64 p 1.0	Sn 68 14.5 p 1.0	Sn 70 26.5 m p 1.0	Sn 71 4.8 m p 1.0	Sn 72 38.5 p 1.0	Sn 73 17.5 p 1.0	Sn 74 13.0 m p 1.0	Sn 75 1.1	Sn 76 14.5 p 1.0	Sn 77 1.1 p 1.0	Sn 78 1.1 p 1.0	Sn 79 1.1 p 1.0	Sn 80 1.1 p 1.0	Sn 81 1.1 p 1.0	Sn 82 1.1 p 1.0	Sn 83 1.1 p 1.0
33	As 74.9218 p 1.0	As 68 1.0 p 1.0	As 70 1.0 p 1.0	As 71 1.0 p 1.0	As 72 1.0 p 1.0	As 73 1.0 p 1.0	As 74 1.0 p 1.0	As 75 1.0 p 1.0	As 76 1.0 p 1.0	As 77 1.0 p 1.0	As 78 1.0 p 1.0	As 79 1.0 p 1.0	As 80 1.0 p 1.0	As 81 1.0 p 1.0	As 82 1.0 p 1.0	As 83 1.0 p 1.0
32	Ge 72.64 p 1.0	Ge 68 1.0 p 1.0	Ge 70 1.0 p 1.0	Ge 71 1.0 p 1.0	Ge 72 1.0 p 1.0	Ge 73 1.0 p 1.0	Ge 74 1.0 p 1.0	Ge 75 1.0 p 1.0	Ge 76 1.0 p 1.0	Ge 77 1.0 p 1.0	Ge 78 1.0 p 1.0	Ge 79 1.0 p 1.0	Ge 80 1.0 p 1.0	Ge 81 1.0 p 1.0	Ge 82 1.0 p 1.0	Ge 83 1.0 p 1.0
31	Se 78.96 p 1.0	Se 68 1.0 p 1.0	Se 70 1.0 p 1.0	Se 71 1.0 p 1.0	Se 72 1.0 p 1.0	Se 73 1.0 p 1.0	Se 74 1.0 p 1.0	Se 75 1.0 p 1.0	Se 76 1.0 p 1.0	Se 77 1.0 p 1.0	Se 78 1.0 p 1.0	Se 79 1.0 p 1.0	Se 80 1.0 p 1.0	Se 81 1.0 p 1.0	Se 82 1.0 p 1.0	Se 83 1.0 p 1.0
30	Br 79.904 p 1.0	Br 68 1.0 p 1.0	Br 70 1.0 p 1.0	Br 71 1.0 p 1.0	Br 72 1.0 p 1.0	Br 73 1.0 p 1.0	Br 74 1.0 p 1.0	Br 75 1.0 p 1.0	Br 76 1.0 p 1.0	Br 77 1.0 p 1.0	Br 78 1.0 p 1.0	Br 79 1.0 p 1.0	Br 80 1.0 p 1.0	Br 81 1.0 p 1.0	Br 82 1.0 p 1.0	Br 83 1.0 p 1.0
29	Kr 83.80 p 1.0	Kr 68 1.0 p 1.0	Kr 70 1.0 p 1.0	Kr 71 1.0 p 1.0	Kr 72 1.0 p 1.0	Kr 73 1.0 p 1.0	Kr 74 1.0 p 1.0	Kr 75 1.0 p 1.0	Kr 76 1.0 p 1.0	Kr 77 1.0 p 1.0	Kr 78 1.0 p 1.0	Kr 79 1.0 p 1.0	Kr 80 1.0 p 1.0	Kr 81 1.0 p 1.0	Kr 82 1.0 p 1.0	Kr 83 1.0 p 1.0
28	Rb 85.468 p 1.0	Rb 68 1.0 p 1.0	Rb 70 1.0 p 1.0	Rb 71 1.0 p 1.0	Rb 72 1.0 p 1.0	Rb 73 1.0 p 1.0	Rb 74 1.0 p 1.0	Rb 75 1.0 p 1.0	Rb 76 1.0 p 1.0	Rb 77 1.0 p 1.0	Rb 78 1.0 p 1.0	Rb 79 1.0 p 1.0	Rb 80 1.0 p 1.0	Rb 81 1.0 p 1.0	Rb 82 1.0 p 1.0	Rb 83 1.0 p 1.0
27	Sr 87.62 p 1.0	Sr 68 1.0 p 1.0	Sr 70 1.0 p 1.0	Sr 71 1.0 p 1.0	Sr 72 1.0 p 1.0	Sr 73 1.0 p 1.0	Sr 74 1.0 p 1.0	Sr 75 1.0 p 1.0	Sr 76 1.0 p 1.0	Sr 77 1.0 p 1.0	Sr 78 1.0 p 1.0	Sr 79 1.0 p 1.0	Sr 80 1.0 p 1.0	Sr 81 1.0 p 1.0	Sr 82 1.0 p 1.0	Sr 83 1.0 p 1.0
26	Y 88.906 p 1.0	Y 68 1.0 p 1.0	Y 70 1.0 p 1.0	Y 71 1.0 p 1.0	Y 72 1.0 p 1.0	Y 73 1.0 p 1.0	Y 74 1.0 p 1.0	Y 75 1.0 p 1.0	Y 76 1.0 p 1.0	Y 77 1.0 p 1.0	Y 78 1.0 p 1.0	Y 79 1.0 p 1.0	Y 80 1.0 p 1.0	Y 81 1.0 p 1.0	Y 82 1.0 p 1.0	Y 83 1.0 p 1.0
25	Zr 91.224 p 1.0	Zr 68 1.0 p 1.0	Zr 70 1.0 p 1.0	Zr 71 1.0 p 1.0	Zr 72 1.0 p 1.0	Zr 73 1.0 p 1.0	Zr 74 1.0 p 1.0	Zr 75 1.0 p 1.0	Zr 76 1.0 p 1.0	Zr 77 1.0 p 1.0	Zr 78 1.0 p 1.0	Zr 79 1.0 p 1.0	Zr 80 1.0 p 1.0	Zr 81 1.0 p 1.0	Zr 82 1.0 p 1.0	Zr 83 1.0 p 1.0
24	Nb 92.906 p 1.0	Nb 68 1.0 p 1.0	Nb 70 1.0 p 1.0	Nb 71 1.0 p 1.0	Nb 72 1.0 p 1.0	Nb 73 1.0 p 1.0	Nb 74 1.0 p 1.0	Nb 75 1.0 p 1.0	Nb 76 1.0 p 1.0	Nb 77 1.0 p 1.0	Nb 78 1.0 p 1.0	Nb 79 1.0 p 1.0	Nb 80 1.0 p 1.0	Nb 81 1.0 p 1.0	Nb 82 1.0 p 1.0	Nb 83 1.0 p 1.0
23	Mo 95.94 p 1.0	Mo 68 1.0 p 1.0	Mo 70 1.0 p 1.0	Mo 71 1.0 p 1.0	Mo 72 1.0 p 1.0	Mo 73 1.0 p 1.0	Mo 74 1.0 p 1.0	Mo 75 1.0 p 1.0	Mo 76 1.0 p 1.0	Mo 77 1.0 p 1.0	Mo 78 1.0 p 1.0	Mo 79 1.0 p 1.0	Mo 80 1.0 p 1.0	Mo 81 1.0 p 1.0	Mo 82 1.0 p 1.0	Mo 83 1.0 p 1.0
22	Tc 98.906 p 1.0	Tc 68 1.0 p 1.0	Tc 70 1.0 p 1.0	Tc 71 1.0 p 1.0	Tc 72 1.0 p 1.0	Tc 73 1.0 p 1.0	Tc 74 1.0 p 1.0	Tc 75 1.0 p 1.0	Tc 76 1.0 p 1.0	Tc 77 1.0 p 1.0	Tc 78 1.0 p 1.0	Tc 79 1.0 p 1.0	Tc 80 1.0 p 1.0	Tc 81 1.0 p 1.0	Tc 82 1.0 p 1.0	Tc 83 1.0 p 1.0
21	Ru 101.07 p 1.0	Ru 68 1.0 p 1.0	Ru 70 1.0 p 1.0	Ru 71 1.0 p 1.0	Ru 72 1.0 p 1.0	Ru 73 1.0 p 1.0	Ru 74 1.0 p 1.0	Ru 75 1.0 p 1.0	Ru 76 1.0 p 1.0	Ru 77 1.0 p 1.0	Ru 78 1.0 p 1.0	Ru 79 1.0 p 1.0	Ru 80 1.0 p 1.0	Ru 81 1.0 p 1.0	Ru 82 1.0 p 1.0	Ru 83 1.0 p 1.0
20	Rh 102.91 p 1.0	Rh 68 1.0 p 1.0	Rh 70 1.0 p 1.0	Rh 71 1.0 p 1.0	Rh 72 1.0 p 1.0	Rh 73 1.0 p 1.0	Rh 74 1.0 p 1.0	Rh 75 1.0 p 1.0	Rh 76 1.0 p 1.0	Rh 77 1.0 p 1.0	Rh 78 1.0 p 1.0	Rh 79 1.0 p 1.0	Rh 80 1.0 p 1.0	Rh 81 1.0 p 1.0	Rh 82 1.0 p 1.0	Rh 83 1.0 p 1.0
19	Pd 106.36 p 1.0	Pd 68 1.0 p 1.0	Pd 70 1.0 p 1.0	Pd 71 1.0 p 1.0	Pd 72 1.0 p 1.0	Pd 73 1.0 p 1.0	Pd 74 1.0 p 1.0	Pd 75 1.0 p 1.0	Pd 76 1.0 p 1.0	Pd 77 1.0 p 1.0	Pd 78 1.0 p 1.0	Pd 79 1.0 p 1.0	Pd 80 1.0 p 1.0	Pd 81 1.0 p 1.0	Pd 82 1.0 p 1.0	Pd 83 1.0 p 1.0
18	Ag 107.868 p 1.0	Ag 68 1.0 p 1.0	Ag 70 1.0 p 1.0	Ag 71 1.0 p 1.0	Ag 72 1.0 p 1.0	Ag 73 1.0 p 1.0	Ag 74 1.0 p 1.0	Ag 75 1.0 p 1.0	Ag 76 1.0 p 1.0	Ag 77 1.0 p 1.0	Ag 78 1.0 p 1.0	Ag 79 1.0 p 1.0	Ag 80 1.0 p 1.0	Ag 81 1.0 p 1.0	Ag 82 1.0 p 1.0	Ag 83 1.0 p 1.0
17	Cd 112.411 p 1.0	Cd 68 1.0 p 1.0	Cd 70 1.0 p 1.0	Cd 71 1.0 p 1.0	Cd 72 1.0 p 1.0	Cd 73 1.0 p 1.0	Cd 74 1.0 p 1.0	Cd 75 1.0 p 1.0	Cd 76 1.0 p 1.0	Cd 77 1.0 p 1.0	Cd 78 1.0 p 1.0	Cd 79 1.0 p 1.0	Cd 80 1.0 p 1.0	Cd 81 1.0 p 1.0	Cd 82 1.0 p 1.0	Cd 83 1.0 p 1.0
16	In 114.818 p 1.0	In 68 1.0 p 1.0	In 70 1.0 p 1.0	In 71 1.0 p 1.0	In 72 1.0 p 1.0	In 73 1.0 p 1.0	In 74 1.0 p 1.0	In 75 1.0 p 1.0	In 76 1.0 p 1.0	In 77 1.0 p 1.0	In 78 1.0 p 1.0	In 79 1.0 p 1.0	In 80 1.0 p 1.0	In 81 1.0 p 1.0	In 82 1.0 p 1.0	In 83 1.0 p 1.0
15	Sn 118.710 p 1.0	Sn 68 1.0 p 1.0	Sn 70 1.0 p 1.0	Sn 71 1.0 p 1.0	Sn 72 1.0 p 1.0	Sn 73 1.0 p 1.0	Sn 74 1.0 p 1.0	Sn 75 1.0 p 1.0	Sn 76 1.0 p 1.0	Sn 77 1.0 p 1.0	Sn 78 1.0 p 1.0	Sn 79 1.0 p 1.0	Sn 80 1.0 p 1.0	Sn 81 1.0 p 1.0	Sn 82 1.0 p 1.0	Sn 83 1.0 p 1.0
14	Sb 121.757 p 1.0	Sb 68 1.0 p 1.0	Sb 70 1.0 p 1.0	Sb 71 1.0 p 1.0	Sb 72 1.0 p 1.0	Sb 73 1.0 p 1.0	Sb 74 1.0 p 1.0	Sb 75 1.0 p 1.0	Sb 76 1.0 p 1.0	Sb 77 1.0 p 1.0	Sb 78 1.0 p 1.0	Sb 79 1.0 p 1.0	Sb 80 1.0 p 1.0	Sb 81 1.0 p 1.0	Sb 82 1.0 p 1.0	Sb 83 1.0 p 1.0
13	Te 127.60 p 1.0	Te 68 1.0 p 1.0	Te 70 1.0 p 1.0	Te 71 1.0 p 1.0	Te 72 1.0 p 1.0	Te 73 1.0 p 1.0	Te 74 1.0 p 1.0	Te 75 1.0 p 1.0	Te 76 1.0 p 1.0	Te 77 1.0 p 1.0	Te 78 1.0 p 1.0	Te 79 1.0 p 1.0	Te 80 1.0 p 1.0	Te 81 1.0 p 1.0	Te 82 1.0 p 1.0	Te 83 1.0 p 1.0
12	I 126.905 p 1.0	I 68 1.0 p 1.0	I 70 1.0 p 1.0	I 71 1.0 p 1.0	I 72 1.0 p 1.0	I 73 1.0 p 1.0	I 74 1.0 p 1.0	I 75 1.0 p 1.0	I 76 1.0 p 1.0	I 77 1.0 p 1.0	I 78 1.0 p 1.0	I 79 1.0 p 1.0	I 80 1.0 p 1.0	I 81 1.0 p 1.0	I 82 1.0 p 1.0	I 83 1.0 p 1.0
11	Xe 131.29 p 1.0	Xe 68 1.0 p 1.0	Xe 70 1.0 p 1.0	Xe 71 1.0 p 1.0	Xe 72 1.0 p 1.0	Xe 73 1.0 p 1.0	Xe 74 1.0 p 1.0	Xe 75 1.0 p 1.0	Xe 76 1.0 p 1.0	Xe 77 1.0 p 1.0	Xe 78 1.0 p 1.0	Xe 79 1.0 p 1.0	Xe 80 1.0 p 1.0	Xe 81 1.0 p 1.0	Xe 82 1.0 p 1.0	Xe 83 1.0 p 1.0
10	Ba 137.327 p 1.0	Ba 68 1.0 p 1.0	Ba 70 1.0 p 1.0	Ba 71 1.0 p 1.0	Ba 72 1.0 p 1.0	Ba 73 1.0 p 1.0	Ba 74 1.0 p 1.0	Ba 75 1.0 p 1.0	Ba 76 1.0 p 1.0	Ba 77 1.0 p 1.0	Ba 78 1.0 p 1.0	Ba 79 1.0 p 1.0	Ba 80 1.0 p 1.0	Ba 81 1.0 p 1.0	Ba 82 1.0 p 1.0	Ba 83 1.0 p 1.0
9	La 138.905 p 1.0	La 68 1.0 p 1.0	La 70 1.0 p 1.0	La 71 1.0 p 1.0	La 72 1.0 p 1.0	La 73 1.0 p 1.0	La 74 1.0 p 1.0	La 75 1.0 p 1.0	La 76 1.0 p 1.0	La 77 1.0 p 1.0	La 78 1.0 p 1.0	La 79 1.0 p 1.0	La 80 1.0 p 1.0	La 81 1.0 p 1.0	La 82 1.0 p 1.0	La 83 1.0 p 1.0
8	Ce 140.12 p 1.0	Ce 68 1.0 p 1.0	Ce 70 1.0 p 1.0	Ce 71 1.0 p 1.0	Ce 72 1.0 p 1.0	Ce 73 1.0 p 1.0	Ce 74 1.0 p 1.0	Ce 75 1.0 p 1.0	Ce 76 1.0 p 1.0	Ce 77 1.0 p 1.0	Ce 78 1.0 p 1.0	Ce 79 1.0 p 1.0	Ce 80 1.0 p 1.0	Ce 81 1.0 p 1.0	Ce 82 1.0 p 1.0	Ce 83 1.0 p 1.0
7	Pr 140.907 p 1.0	Pr 68 1.0 p 1.0	Pr 70 1.0 p 1.0	Pr 71 1.0 p 1.0	Pr 72 1.0 p 1.0	Pr 73 1.0 p 1.0	Pr 74 1.0 p 1.0	Pr 75 1.0 p 1.0	Pr 76 1.0 p 1.0	Pr 77 1.0 p 1.0	Pr 78 1.0 p 1.0	Pr 79 1.0 p 1.0	Pr 80 1.0 p 1.0	Pr 81 1.0 p 1.0	Pr 82 1.0 p 1.0	Pr 83 1.0 p 1.0
6	Nd 144.24 p 1.0	Nd 68 1.0 p 1.0	Nd 70 1.0 p 1.0	Nd 71 1.0 p 1.0	Nd 72 1.0 p 1.0	Nd 73 1.0 p 1.0	Nd 74 1.0 p 1.0	Nd 75 1.0 p 1.0	Nd 76 1.0 p 1.0	Nd 77 1.0 p 1.0	Nd 78 1.0 p 1.0	Nd 79 1.0 p 1.0	Nd 80 1.0 p 1.0	Nd 81 1.0 p 1.0	Nd 82 1.0 p 1.0	Nd 83 1.0 p 1.0
5	Pm 144.912 p 1.0	Pm 68 1.0 p 1.0	Pm 70 1.0 p 1.0	Pm 71 1.0 p 1.0	Pm 72 1.0 p 1.0	Pm 73 1.0 p 1.0	Pm 74 1.0 p 1.0	Pm 75 1.0 p 1.0	Pm 76 1.0 p 1.0	Pm 77 1.0 p 1.0	Pm 78 1.0 p 1.0	Pm 79 1.0 p 1.0	Pm 80 1.0 p 1.0	Pm 81 1.0 p 1.0	Pm 82 1.0 p 1.0	Pm 83 1.0 p 1.0
4	Sm 150.36 p 1.0	Sm 68 1.0 p 1.0	Sm 70 1.0 p 1.0	Sm 71 1.0 p 1.0	Sm 72 1.0 p 1.0	Sm 73 1.0 p 1.0	Sm 74 1.0 p 1.0	Sm 75 1.0 p 1.0	Sm 76 1.0 p 1.0	Sm 77 1.0 p 1.0	Sm 78 1.0 p 1.0	Sm 79 1.0 p 1.0	Sm 80 1.0 p 1.0	Sm 81 1.0 p 1.0	Sm 82 1.0 p 1.0	Sm 83 1.0 p 1.0
3	Eu 151.964 p 1.0	Eu 68 1.0 p 1.0	Eu 70 1.0 p 1.0	Eu 71 1.0 p 1.0	Eu 72 1.0 p 1.0	Eu 73 1.0 p 1.0	Eu 74 1.0 p 1.0	Eu 75 1.0 p 1.0	Eu 76 1.0 p 1.0	Eu 77 1.0 p 1.0	Eu 78 1.0 p 1.0	Eu 79 1.0 p 1.0	Eu 80 1.0 p 1.0	Eu 81 1.0 p 1.0	Eu 82 1.0 p 1.0	Eu 83 1.0 p 1.0
2	Gd 157.25 p 1.0	Gd 68 1.0 p 1.0	Gd 70 1.0 p 1.0	Gd 71 1.0 p 1.0	Gd 72 1.0 p 1.0	Gd 73 1.0 p 1.0	Gd 74 1.0 p 1.0	Gd 75 1.0 p 1.0	Gd 76 1.0 p 1.0	Gd 77 1.0 p 1.0	Gd 78 1.0 p 1.0	Gd 79 1.0 p 1.0	Gd 80 1.0 p 1.0	Gd 81 1.0 p 1.0	Gd 82 1.0 p 1.0	Gd 83 1.0 p 1.0
1	Tb 158.925 p 1.0	Tb 68 1.0 p 1.0	Tb 70 1.0 p 1.0	Tb 71 1.0 p 1.0	Tb 72 1.0 p 1.0	Tb 73 1.0 p 1.0	Tb 74 1.0 p 1.0	Tb 75 1.0 p 1.0	Tb 76 1.0 p 1.0	Tb 77 1.0 p 1.0	Tb 78 1.0 p 1.0	Tb 79 1.0 p 1.0	Tb 80 1.0 p 1.0	Tb 81 1.0 p 1.0	Tb 82 1.0 p 1.0	Tb 83 1.0 p 1.0

[illegible]

[illegible]

[illegible]



Ag 126 126.130 126.130 126.130	Ag 125 125.129 125.129 125.129	Ag 124 124.128 124.128 124.128	Ag 123 123.132 123.132 123.132	Ag 122 122.136 122.136 122.136	Ag 121 121.140 121.140 121.140	Ag 120 120.144 120.144 120.144	Ag 119 119.148 119.148 119.148	Ag 118 118.152 118.152 118.152	Ag 117 117.156 117.156 117.156	Ag 116 116.160 116.160 116.160	Ag 115 115.164 115.164 115.164	Ag 114 114.168 114.168 114.168	Ag 113 113.172 113.172 113.172	Ag 112 112.176 112.176 112.176	Ag 111 111.180 111.180 111.180	Ag 110 110.184 110.184 110.184	Ag 109 109.188 109.188 109.188	Ag 108 108.192 108.192 108.192	Ag 107 107.196 107.196 107.196	Ag 106 106.200 106.200 106.200	Ag 105 105.204 105.204 105.204	Ag 104 104.208 104.208 104.208	Ag 103 103.212 103.212 103.212	Ag 102 102.216 102.216 102.216	Ag 101 101.220 101.220 101.220	Ag 100 100.224 100.224 100.224	Ag 99 99.228 99.228 99.228	Ag 98 98.232 98.232 98.232	Ag 97 97.236 97.236 97.236	Ag 96 96.240 96.240 96.240	Ag 95 95.244 95.244 95.244	Ag 94 94.248 94.248 94.248	Ag 93 93.252 93.252 93.252	Ag 92 92.256 92.256 92.256	Ag 91 91.260 91.260 91.260	Ag 90 90.264 90.264 90.264	Ag 89 89.268 89.268 89.268	Ag 88 88.272 88.272 88.272	Ag 87 87.276 87.276 87.276	Ag 86 86.280 86.280 86.280	Ag 85 85.284 85.284 85.284	Ag 84 84.288 84.288 84.288	Ag 83 83.292 83.292 83.292	Ag 82 82.296 82.296 82.296	Ag 81 81.300 81.300 81.300	Ag 80 80.304 80.304 80.304	Ag 79 79.308 79.308 79.308	Ag 78 78.312 78.312 78.312	Ag 77 77.316 77.316 77.316	Ag 76 76.320 76.320 76.320	Ag 75 75.324 75.324 75.324	Ag 74 74.328 74.328 74.328	Ag 73 73.332 73.332 73.332	Ag 72 72.336 72.336 72.336	Ag 71 71.340 71.340 71.340	Ag 70 70.344 70.344 70.344	Ag 69 69.348 69.348 69.348	Ag 68 68.352 68.352 68.352	Ag 67 67.356 67.356 67.356	Ag 66 66.360 66.360 66.360	Ag 65 65.364 65.364 65.364	Ag 64 64.368 64.368 64.368	Ag 63 63.372 63.372 63.372	Ag 62 62.376 62.376 62.376	Ag 61 61.380 61.380 61.380	Ag 60 60.384 60.384 60.384	Ag 59 59.388 59.388 59.388	Ag 58 58.392 58.392 58.392	Ag 57 57.396 57.396 57.396	Ag 56 56.400 56.400 56.400	Ag 55 55.404 55.404 55.404	Ag 54 54.408 54.408 54.408	Ag 53 53.412 53.412 53.412	Ag 52 52.416 52.416 52.416	Ag 51 51.420 51.420 51.420	Ag 50 50.424 50.424 50.424	Ag 49 49.428 49.428 49.428	Ag 48 48.432 48.432 48.432	Ag 47 47.436 47.436 47.436	Ag 46 46.440 46.440 46.440	Ag 45 45.444 45.444 45.444	Ag 44 44.448 44.448 44.448	Ag 43 43.452 43.452 43.452	Ag 42 42.456 42.456 42.456	Ag 41 41.460 41.460 41.460	Ag 40 40.464 40.464 40.464	Ag 39 39.468 39.468 39.468	Ag 38 38.472 38.472 38.472	Ag 37 37.476 37.476 37.476	Ag 36 36.480 36.480 36.480	Ag 35 35.484 35.484 35.484	Ag 34 34.488 34.488 34.488	Ag 33 33.492 33.492 33.492	Ag 32 32.496 32.496 32.496	Ag 31 31.500 31.500 31.500	Ag 30 30.504 30.504 30.504	Ag 29 29.508 29.508 29.508	Ag 28 28.512 28.512 28.512	Ag 27 27.516 27.516 27.516	Ag 26 26.520 26.520 26.520	Ag 25 25.524 25.524 25.524	Ag 24 24.528 24.528 24.528	Ag 23 23.532 23.532 23.532	Ag 22 22.536 22.536 22.536	Ag 21 21.540 21.540 21.540	Ag 20 20.544 20.544 20.544	Ag 19 19.548 19.548 19.548	Ag 18 18.552 18.552 18.552	Ag 17 17.556 17.556 17.556	Ag 16 16.560 16.560 16.560	Ag 15 15.564 15.564 15.564	Ag 14 14.568 14.568 14.568	Ag 13 13.572 13.572 13.572	Ag 12 12.576 12.576 12.576	Ag 11 11.580 11.580 11.580	Ag 10 10.584 10.584 10.584
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

[illegible]





W173 78.8m	W174 28m	W175 54m	W176 2.5h	W177 2.25h 2.5h	W178 23d	W179 8.1m 2.3h	W180 13.2d	W181 13.2d	W182 18.5m 1.5h	W183 2.5h 1.5h	W184 2.5h 1.5h	W185 2.5h 1.5h	W186 2.5h 1.5h	W187 2.5h 1.5h	W188 2.5h 1.5h
Ts172 37.5m	Ts173 3.5h 1.5h	Ts174 3.5h 1.5h	Ts175 3.5h 1.5h	Ts176 3.5h 1.5h	Ts177 3.5h 1.5h	Ts178 3.5h 1.5h	Ts179 3.5h 1.5h	Ts180 3.5h 1.5h	Ts181 3.5h 1.5h	Ts182 3.5h 1.5h	Ts183 3.5h 1.5h	Ts184 3.5h 1.5h	Ts185 3.5h 1.5h	Ts186 3.5h 1.5h	Ts187 3.5h 1.5h
W171 12.3h	W172 1.8h	W173 3.5h 1.5h	W174 3.5h 1.5h	W175 3.5h 1.5h	W176 3.5h 1.5h	W177 3.5h 1.5h	W178 3.5h 1.5h	W179 3.5h 1.5h	W180 3.5h 1.5h	W181 3.5h 1.5h	W182 3.5h 1.5h	W183 3.5h 1.5h	W184 3.5h 1.5h	W185 3.5h 1.5h	W186 3.5h 1.5h
Ts170 2.0d	Ts171 1.5h	Ts172 1.5h	Ts173 1.5h	Ts174 1.5h	Ts175 1.5h	Ts176 1.5h	Ts177 1.5h	Ts178 1.5h	Ts179 1.5h	Ts180 1.5h	Ts181 1.5h	Ts182 1.5h	Ts183 1.5h	Ts184 1.5h	Ts185 1.5h
W169 8.5d	W170 12.8d	W171 12.8d	W172 12.8d	W173 12.8d	W174 12.8d	W175 12.8d	W176 12.8d	W177 12.8d	W178 12.8d	W179 12.8d	W180 12.8d	W181 12.8d	W182 12.8d	W183 12.8d	W184 12.8d
W167 22.8h	W168 22.8h	W169 22.8h	W170 22.8h	W171 22.8h	W172 22.8h	W173 22.8h	W174 22.8h	W175 22.8h	W176 22.8h	W177 22.8h	W178 22.8h	W179 22.8h	W180 22.8h	W181 22.8h	W182 22.8h
W165 18.5h	W166 18.5h	W167 18.5h	W168 18.5h	W169 18.5h	W170 18.5h	W171 18.5h	W172 18.5h	W173 18.5h	W174 18.5h	W175 18.5h	W176 18.5h	W177 18.5h	W178 18.5h	W179 18.5h	W180 18.5h
W163 14.5h	W164 14.5h	W165 14.5h	W166 14.5h	W167 14.5h	W168 14.5h	W169 14.5h	W170 14.5h	W171 14.5h	W172 14.5h	W173 14.5h	W174 14.5h	W175 14.5h	W176 14.5h	W177 14.5h	W178 14.5h
W161 10.5h	W162 10.5h	W163 10.5h	W164 10.5h	W165 10.5h	W166 10.5h	W167 10.5h	W168 10.5h	W169 10.5h	W170 10.5h	W171 10.5h	W172 10.5h	W173 10.5h	W174 10.5h	W175 10.5h	W176 10.5h
W159 6.5h	W160 6.5h	W161 6.5h	W162 6.5h	W163 6.5h	W164 6.5h	W165 6.5h	W166 6.5h	W167 6.5h	W168 6.5h	W169 6.5h	W170 6.5h	W171 6.5h	W172 6.5h	W173 6.5h	W174 6.5h
W157 2.5h	W158 2.5h	W159 2.5h	W160 2.5h	W161 2.5h	W162 2.5h	W163 2.5h	W164 2.5h	W165 2.5h	W166 2.5h	W167 2.5h	W168 2.5h	W169 2.5h	W170 2.5h	W171 2.5h	W172 2.5h
W155 1.5h	W156 1.5h	W157 1.5h	W158 1.5h	W159 1.5h	W160 1.5h	W161 1.5h	W162 1.5h	W163 1.5h	W164 1.5h	W165 1.5h	W166 1.5h	W167 1.5h	W168 1.5h	W169 1.5h	W170 1.5h
W153 0.5h	W154 0.5h	W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h
W151 0.5h	W152 0.5h	W153 0.5h	W154 0.5h	W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h
W149 0.5h	W150 0.5h	W151 0.5h	W152 0.5h	W153 0.5h	W154 0.5h	W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h

W185 18.5m 1.5h	W186 2.5h 1.5h	W187 2.5h 1.5h	W188 2.5h 1.5h	W189 2.5h 1.5h	W190 2.5h 1.5h	W191 2.5h 1.5h	W192 2.5h 1.5h	W193 2.5h 1.5h	W194 2.5h 1.5h	W195 2.5h 1.5h	W196 2.5h 1.5h	W197 2.5h 1.5h	W198 2.5h 1.5h	W199 2.5h 1.5h	W200 2.5h 1.5h
Ts184 3.5h 1.5h	Ts185 3.5h 1.5h	Ts186 3.5h 1.5h	Ts187 3.5h 1.5h	Ts188 3.5h 1.5h	Ts189 3.5h 1.5h	Ts190 3.5h 1.5h	Ts191 3.5h 1.5h	Ts192 3.5h 1.5h	Ts193 3.5h 1.5h	Ts194 3.5h 1.5h	Ts195 3.5h 1.5h	Ts196 3.5h 1.5h	Ts197 3.5h 1.5h	Ts198 3.5h 1.5h	Ts199 3.5h 1.5h
W183 2.5h 1.5h	W184 2.5h 1.5h	W185 2.5h 1.5h	W186 2.5h 1.5h	W187 2.5h 1.5h	W188 2.5h 1.5h	W189 2.5h 1.5h	W190 2.5h 1.5h	W191 2.5h 1.5h	W192 2.5h 1.5h	W193 2.5h 1.5h	W194 2.5h 1.5h	W195 2.5h 1.5h	W196 2.5h 1.5h	W197 2.5h 1.5h	W198 2.5h 1.5h
Ts182 3.5h 1.5h	Ts183 3.5h 1.5h	Ts184 3.5h 1.5h	Ts185 3.5h 1.5h	Ts186 3.5h 1.5h	Ts187 3.5h 1.5h	Ts188 3.5h 1.5h	Ts189 3.5h 1.5h	Ts190 3.5h 1.5h	Ts191 3.5h 1.5h	Ts192 3.5h 1.5h	Ts193 3.5h 1.5h	Ts194 3.5h 1.5h	Ts195 3.5h 1.5h	Ts196 3.5h 1.5h	Ts197 3.5h 1.5h
W181 12.3h	W182 1.8h	W183 3.5h 1.5h	W184 3.5h 1.5h	W185 3.5h 1.5h	W186 3.5h 1.5h	W187 3.5h 1.5h	W188 3.5h 1.5h	W189 3.5h 1.5h	W190 3.5h 1.5h	W191 3.5h 1.5h	W192 3.5h 1.5h	W193 3.5h 1.5h	W194 3.5h 1.5h	W195 3.5h 1.5h	W196 3.5h 1.5h
Ts180 2.0d	Ts181 1.5h	Ts182 1.5h	Ts183 1.5h	Ts184 1.5h	Ts185 1.5h	Ts186 1.5h	Ts187 1.5h	Ts188 1.5h	Ts189 1.5h	Ts190 1.5h	Ts191 1.5h	Ts192 1.5h	Ts193 1.5h	Ts194 1.5h	Ts195 1.5h
W179 8.5d	W180 12.8d	W181 12.8d	W182 12.8d	W183 12.8d	W184 12.8d	W185 12.8d	W186 12.8d	W187 12.8d	W188 12.8d	W189 12.8d	W190 12.8d	W191 12.8d	W192 12.8d	W193 12.8d	W194 12.8d
W177 22.8h	W178 22.8h	W179 22.8h	W180 22.8h	W181 22.8h	W182 22.8h	W183 22.8h	W184 22.8h	W185 22.8h	W186 22.8h	W187 22.8h	W188 22.8h	W189 22.8h	W190 22.8h	W191 22.8h	W192 22.8h
W175 18.5h	W176 18.5h	W177 18.5h	W178 18.5h	W179 18.5h	W180 18.5h	W181 18.5h	W182 18.5h	W183 18.5h	W184 18.5h	W185 18.5h	W186 18.5h	W187 18.5h	W188 18.5h	W189 18.5h	W190 18.5h
W173 14.5h	W174 14.5h	W175 14.5h	W176 14.5h	W177 14.5h	W178 14.5h	W179 14.5h	W180 14.5h	W181 14.5h	W182 14.5h	W183 14.5h	W184 14.5h	W185 14.5h	W186 14.5h	W187 14.5h	W188 14.5h
W171 10.5h	W172 10.5h	W173 10.5h	W174 10.5h	W175 10.5h	W176 10.5h	W177 10.5h	W178 10.5h	W179 10.5h	W180 10.5h	W181 10.5h	W182 10.5h	W183 10.5h	W184 10.5h	W185 10.5h	W186 10.5h
W169 6.5h	W170 6.5h	W171 6.5h	W172 6.5h	W173 6.5h	W174 6.5h	W175 6.5h	W176 6.5h	W177 6.5h	W178 6.5h	W179 6.5h	W180 6.5h	W181 6.5h	W182 6.5h	W183 6.5h	W184 6.5h
W167 2.5h	W168 2.5h	W169 2.5h	W170 2.5h	W171 2.5h	W172 2.5h	W173 2.5h	W174 2.5h	W175 2.5h	W176 2.5h	W177 2.5h	W178 2.5h	W179 2.5h	W180 2.5h	W181 2.5h	W182 2.5h
W165 1.5h	W166 1.5h	W167 1.5h	W168 1.5h	W169 1.5h	W170 1.5h	W171 1.5h	W172 1.5h	W173 1.5h	W174 1.5h	W175 1.5h	W176 1.5h	W177 1.5h	W178 1.5h	W179 1.5h	W180 1.5h
W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h	W169 0.5h	W170 0.5h	W171 0.5h	W172 0.5h	W173 0.5h	W174 0.5h	W175 0.5h	W176 0.5h	W177 0.5h	W178 0.5h
W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h	W169 0.5h	W170 0.5h	W171 0.5h	W172 0.5h	W173 0.5h	W174 0.5h	W175 0.5h	W176 0.5h
W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h	W169 0.5h	W170 0.5h	W171 0.5h	W172 0.5h	W173 0.5h	W174 0.5h
W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h	W169 0.5h	W170 0.5h	W171 0.5h	W172 0.5h
W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h	W169 0.5h	W170 0.5h
W153 0.5h	W154 0.5h	W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h	W167 0.5h	W168 0.5h
W151 0.5h	W152 0.5h	W153 0.5h	W154 0.5h	W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h	W165 0.5h	W166 0.5h
W149 0.5h	W150 0.5h	W151 0.5h	W152 0.5h	W153 0.5h	W154 0.5h	W155 0.5h	W156 0.5h	W157 0.5h	W158 0.5h	W159 0.5h	W160 0.5h	W161 0.5h	W162 0.5h	W163 0.5h	W164 0.5h

W195 18.5m 1.5h	W196 2.5h 1.5h	W197 2.5h 1.5h	W198 2.5h 1.5h	W199 2.5h 1.5h	W200 2.5h 1.5h	W201 2.5h 1.5h	W202 2.5h 1.5h	W203 2.5h 1.5h	W204 2.5h 1.5h	W205 2.5h 1.5h	W206 2.5h 1.5h	W207 2.5h 1.5h	W208 2.5h 1.5h	W209 2.5h 1.5h	W210 2.5h 1.5h
Ts194 3.5h 1.5h	Ts195 3.5h 1.5h	Ts196 3.5h 1.5h	Ts197 3.5h 1.5h	Ts198 3.5h 1.5h	Ts199 3.5h 1.5h	Ts200 3.5h 1.5h	Ts201 3.5h 1.5h	Ts202 3.5h 1.5h	Ts203 3.5h 1.5h	Ts204 3.5h 1.5h	Ts205 3.5h 1.5h	Ts206 3.5h 1.5h	Ts207 3.5h 1.5h	Ts208 3.5h 1.5h	Ts209 3.5h 1.5h
W193 2.5h 1.5h	W194 2.5h 1.5h	W195 2.5h 1.5h	W196 2.5h 1.5h	W197 2.5h 1.5h	W198 2.5h 1.5h	W199 2.5h 1.5h	W200 2.5h 1.5h	W201 2.5h 1.5h	W202 2.5h 1.5h	W203 2.5h 1.5h	W204 2.5h 1.5h	W205 2.5h 1.5h	W206 2.5h 1.5h	W207 2.5h 1.5h	W208 2.5h 1.5h
Ts192 3.5h 1.5h	Ts193 3.5h 1.5h	Ts194 3.5h 1.5h	Ts195 3.5h 1.5h	Ts196 3.5h 1.5h	Ts197 3.5h 1.5h	Ts198 3.5h 1.5h	Ts199 3.5h 1.5h	Ts200 3.5h 1.5h	Ts201 3.5h 1.5h	Ts202 3.5h 1.5h	Ts203 3.5h 1.5h	Ts204 3.5h 1.5h	Ts205 3.5h 1.5h	Ts206 3.5h 1.5h	Ts207 3.5h 1.5h
W191 12.3h	W192 1.8h	W193 3.5h 1.5h	W194 3.5h 1.5h	W195 3.5h 1.5h	W196 3.5h 1.5h	W197 3.5h 1.5h	W198 3.5h 1.5h	W199 3.5h 1.5h	W200 3.5h 1.5h	W201 3.5h 1.5h	W202 3.5h 1.5h	W203 3.5h 1.5h	W204 3.5h 1.5h	W205 3.5h 1.5h	W206 3.5h 1.5h
Ts190 2.0d	Ts191 1.5h	Ts192 1.5h	Ts193 1.5h	Ts194 1.5h	Ts195 1.5h	Ts196 1.5h	Ts197 1.5h	Ts198 1.5h	Ts199 1.5h	Ts200 1.5h	Ts201 1.5h	Ts202 1.5h	Ts203 1.5h	Ts204 1.5h	Ts205 1.5h
W189 8.5d	W190 12.8d	W191 12.8d	W192 12.8d	W193 12.8d	W194 12.8d	W195 12.8d	W196 12.8d	W197 12.8d	W198 12.8d	W199 12.8d	W200 12.8d	W201 12.8d	W202 12.8d	W203 12.8d	W204 12.8d
W187 22.8h	W188 22.8h	W189 22.8h	W190 22.8h	W191 22.8h	W192 22.8h	W193 22.8h	W194 22.8h	W195 22.8h	W196 22.8h	W197 22.8h	W198 22.8h	W199 22.8h	W200 22.8h	W201 22.8h	W202 22.8h
W185 18.5h	W186 18.5h														

86	85	84	83	82	81																																																																								
<table border="1"> <tr> <td>Al</td> <td>Po</td> <td>At</td> <td>Fr</td> <td>Ra</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>Al 138 0.3g</td> <td>Po 199 0.4g</td> <td>At 197 0.4g</td> <td>Fr 199 0.4g</td> <td>Ra 200 0.5g</td> <td>Ac 199 0.5g</td> </tr> </table>	Al	Po	At	Fr	Ra	Ac	Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g	<table border="1"> <tr> <td>Al</td> <td>Po</td> <td>At</td> <td>Fr</td> <td>Ra</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>Al 138 0.3g</td> <td>Po 199 0.4g</td> <td>At 197 0.4g</td> <td>Fr 199 0.4g</td> <td>Ra 200 0.5g</td> <td>Ac 199 0.5g</td> </tr> </table>	Al	Po	At	Fr	Ra	Ac	Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g	<table border="1"> <tr> <td>Al</td> <td>Po</td> <td>At</td> <td>Fr</td> <td>Ra</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>Al 138 0.3g</td> <td>Po 199 0.4g</td> <td>At 197 0.4g</td> <td>Fr 199 0.4g</td> <td>Ra 200 0.5g</td> <td>Ac 199 0.5g</td> </tr> </table>	Al	Po	At	Fr	Ra	Ac	Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g	<table border="1"> <tr> <td>Al</td> <td>Po</td> <td>At</td> <td>Fr</td> <td>Ra</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>Al 138 0.3g</td> <td>Po 199 0.4g</td> <td>At 197 0.4g</td> <td>Fr 199 0.4g</td> <td>Ra 200 0.5g</td> <td>Ac 199 0.5g</td> </tr> </table>	Al	Po	At	Fr	Ra	Ac	Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g	<table border="1"> <tr> <td>Al</td> <td>Po</td> <td>At</td> <td>Fr</td> <td>Ra</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>Al 138 0.3g</td> <td>Po 199 0.4g</td> <td>At 197 0.4g</td> <td>Fr 199 0.4g</td> <td>Ra 200 0.5g</td> <td>Ac 199 0.5g</td> </tr> </table>	Al	Po	At	Fr	Ra	Ac	Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g	<table border="1"> <tr> <td>Al</td> <td>Po</td> <td>At</td> <td>Fr</td> <td>Ra</td> <td>Ac</td> </tr> <tr> <td>Al 138 0.3g</td> <td>Po 199 0.4g</td> <td>At 197 0.4g</td> <td>Fr 199 0.4g</td> <td>Ra 200 0.5g</td> <td>Ac 199 0.5g</td> </tr> </table>	Al	Po	At	Fr	Ra	Ac	Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g
Al	Po	At	Fr	Ra	Ac																																																																								
Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g																																																																								
Al	Po	At	Fr	Ra	Ac																																																																								
Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g																																																																								
Al	Po	At	Fr	Ra	Ac																																																																								
Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g																																																																								
Al	Po	At	Fr	Ra	Ac																																																																								
Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g																																																																								
Al	Po	At	Fr	Ra	Ac																																																																								
Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g																																																																								
Al	Po	At	Fr	Ra	Ac																																																																								
Al 138 0.3g	Po 199 0.4g	At 197 0.4g	Fr 199 0.4g	Ra 200 0.5g	Ac 199 0.5g																																																																								



91	90	89																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
<table><tr><td>Pa 231.0359</td><td>Th 234 0.133</td><td>Th 233 0.046</td><td>Th 232 0.0001</td><td>Th 231 0.0001</td><td>Th 230 0.0001</td><td>Th 229 0.0001</td><td>Th 228 0.0001</td><td>Th 227 0.0001</td><td>Th 226 0.0001</td><td>Th 225 0.0001</td><td>Th 224 0.0001</td><td>Th 223 0.0001</td><td>Th 222 0.0001</td><td>Th 221 0.0001</td><td>Th 220 0.0001</td><td>Th 219 0.0001</td><td>Th 218 0.0001</td><td>Th 217 0.0001</td><td>Th 216 0.0001</td><td>Th 215 0.0001</td><td>Th 214 0.0001</td><td>Th 213 0.0001</td><td>Th 212 0.0001</td><td>Th 211 0.0001</td><td>Th 210 0.0001</td><td>Th 209 0.0001</td><td>Th 208 0.0001</td><td>Th 207 0.0001</td><td>Th 206 0.0001</td><td>Th 205 0.0001</td><td>Th 204 0.0001</td><td>Th 203 0.0001</td><td>Th 202 0.0001</td><td>Th 201 0.0001</td><td>Th 200 0.0001</td><td>Th 199 0.0001</td><td>Th 198 0.0001</td><td>Th 197 0.0001</td><td>Th 196 0.0001</td><td>Th 195 0.0001</td><td>Th 194 0.0001</td><td>Th 193 0.0001</td><td>Th 192 0.0001</td><td>Th 191 0.0001</td><td>Th 190 0.0001</td><td>Th 189 0.0001</td><td>Th 188 0.0001</td><td>Th 187 0.0001</td><td>Th 186 0.0001</td><td>Th 185 0.0001</td><td>Th 184 0.0001</td><td>Th 183 0.0001</td><td>Th 182 0.0001</td><td>Th 181 0.0001</td><td>Th 180 0.0001</td><td>Th 179 0.0001</td><td>Th 178 0.0001</td><td>Th 177 0.0001</td><td>Th 176 0.0001</td><td>Th 175 0.0001</td><td>Th 174 0.0001</td><td>Th 173 0.0001</td><td>Th 172 0.0001</td><td>Th 171 0.0001</td><td>Th 170 0.0001</td><td>Th 169 0.0001</td><td>Th 168 0.0001</td><td>Th 167 0.0001</td><td>Th 166 0.0001</td><td>Th 165 0.0001</td><td>Th 164 0.0001</td><td>Th 163 0.0001</td><td>Th 162 0.0001</td><td>Th 161 0.0001</td><td>Th 160 0.0001</td><td>Th 159 0.0001</td><td>Th 158 0.0001</td><td>Th 157 0.0001</td><td>Th 156 0.0001</td><td>Th 155 0.0001</td><td>Th 154 0.0001</td><td>Th 153 0.0001</td><td>Th 152 0.0001</td><td>Th 151 0.0001</td><td>Th 150 0.0001</td><td>Th 149 0.0001</td><td>Th 148 0.0001</td><td>Th 147 0.0001</td><td>Th 146 0.0001</td><td>Th 145 0.0001</td><td>Th 144 0.0001</td><td>Th 143 0.0001</td><td>Th 142 0.0001</td><td>Th 141 0.0001</td><td>Th 140 0.0001</td><td>Th 139 0.0001</td><td>Th 138 0.0001</td><td>Th 137 0.0001</td><td>Th 136 0.0001</td><td>Th 135 0.0001</td><td>Th 134 0.0001</td><td>Th 133 0.0001</td><td>Th 132 0.0001</td><td>Th 131 0.0001</td><td>Th 130 0.0001</td><td>Th 129 0.0001</td><td>Th 128 0.0001</td><td>Th 127 0.0001</td><td>Th 126 0.0001</td><td>Th 125 0.0001</td><td>Th 124 0.0001</td><td>Th 123 0.0001</td><td>Th 122 0.0001</td><td>Th 121 0.0001</td><td>Th 120 0.0001</td><td>Th 119 0.0001</td><td>Th 118 0.0001</td><td>Th 117 0.0001</td><td>Th 116 0.0001</td><td>Th 115 0.0001</td><td>Th 114 0.0001</td><td>Th 113 0.0001</td><td>Th 112 0.0001</td><td>Th 111 0.0001</td><td>Th 110 0.0001</td><td>Th 109 0.0001</td><td>Th 108 0.0001</td><td>Th 107 0.0001</td><td>Th 106 0.0001</td><td>Th 105 0.0001</td><td>Th 104 0.0001</td><td>Th 103 0.0001</td><td>Th 102 0.0001</td><td>Th 101 0.0001</td><td>Th 100 0.0001</td><td>Th 99 0.0001</td><td>Th 98 0.0001</td><td>Th 97 0.0001</td><td>Th 96 0.0001</td><td>Th 95 0.0001</td><td>Th 94 0.0001</td><td>Th 93 0.0001</td><td>Th 92 0.0001</td><td>Th 91 0.0001</td><td>Th 90 0.0001</td><td>Th 89 0.0001</td><td>Th 88 0.0001</td><td>Th 87 0.0001</td><td>Th 86 0.0001</td><td>Th 85 0.0001</td><td>Th 84 0.0001</td><td>Th 83 0.0001</td><td>Th 82 0.0001</td><td>Th 81 0.0001</td><td>Th 80 0.0001</td><td>Th 79 0.0001</td><td>Th 78 0.0001</td><td>Th 77 0.0001</td><td>Th 76 0.0001</td><td>Th 75 0.0001</td><td>Th 74 0.0001</td><td>Th 73 0.0001</td><td>Th 72 0.0001</td><td>Th 71 0.0001</td><td>Th 70 0.0001</td><td>Th 69 0.0001</td><td>Th 68 0.0001</td><td>Th 67 0.0001</td><td>Th 66 0.0001</td><td>Th 65 0.0001</td><td>Th 64 0.0001</td><td>Th 63 0.0001</td><td>Th 62 0.0001</td><td>Th 61 0.0001</td><td>Th 60 0.0001</td><td>Th 59 0.0001</td><td>Th 58 0.0001</td><td>Th 57 0.0001</td><td>Th 56 0.0001</td><td>Th 55 0.0001</td><td>Th 54 0.0001</td><td>Th 53 0.0001</td><td>Th 52 0.0001</td><td>Th 51 0.0001</td><td>Th 50 0.0001</td><td>Th 49 0.0001</td><td>Th 48 0.0001</td><td>Th 47 0.0001</td><td>Th 46 0.0001</td><td>Th 45 0.0001</td><td>Th 44 0.0001</td><td>Th 43 0.0001</td><td>Th 42 0.0001</td><td>Th 41 0.0001</td><td>Th 40 0.0001</td><td>Th 39 0.0001</td><td>Th 38 0.0001</td><td>Th 37 0.0001</td><td>Th 36 0.0001</td><td>Th 35 0.0001</td><td>Th 34 0.0001</td><td>Th 33 0.0001</td><td>Th 32 0.0001</td><td>Th 31 0.0001</td><td>Th 30 0.0001</td><td>Th 29 0.0001</td><td>Th 28 0.0001</td><td>Th 27 0.0001</td><td>Th 26 0.0001</td><td>Th 25 0.0001</td><td>Th 24 0.0001</td><td>Th 23 0.0001</td><td>Th 22 0.0001</td><td>Th 21 0.0001</td><td>Th 20 0.0001</td><td>Th 19 0.0001</td><td>Th 18</td></tr></table>	Pa 231.0359	Th 234 0.133	Th 233 0.046	Th 232 0.0001	Th 231 0.0001	Th 230 0.0001	Th 229 0.0001	Th 228 0.0001	Th 227 0.0001	Th 226 0.0001	Th 225 0.0001	Th 224 0.0001	Th 223 0.0001	Th 222 0.0001	Th 221 0.0001	Th 220 0.0001	Th 219 0.0001	Th 218 0.0001	Th 217 0.0001	Th 216 0.0001	Th 215 0.0001	Th 214 0.0001	Th 213 0.0001	Th 212 0.0001	Th 211 0.0001	Th 210 0.0001	Th 209 0.0001	Th 208 0.0001	Th 207 0.0001	Th 206 0.0001	Th 205 0.0001	Th 204 0.0001	Th 203 0.0001	Th 202 0.0001	Th 201 0.0001	Th 200 0.0001	Th 199 0.0001	Th 198 0.0001	Th 197 0.0001	Th 196 0.0001	Th 195 0.0001	Th 194 0.0001	Th 193 0.0001	Th 192 0.0001	Th 191 0.0001	Th 190 0.0001	Th 189 0.0001	Th 188 0.0001	Th 187 0.0001	Th 186 0.0001	Th 185 0.0001	Th 184 0.0001	Th 183 0.0001	Th 182 0.0001	Th 181 0.0001	Th 180 0.0001	Th 179 0.0001	Th 178 0.0001	Th 177 0.0001	Th 176 0.0001	Th 175 0.0001	Th 174 0.0001	Th 173 0.0001	Th 172 0.0001	Th 171 0.0001	Th 170 0.0001	Th 169 0.0001	Th 168 0.0001	Th 167 0.0001	Th 166 0.0001	Th 165 0.0001	Th 164 0.0001	Th 163 0.0001	Th 162 0.0001	Th 161 0.0001	Th 160 0.0001	Th 159 0.0001	Th 158 0.0001	Th 157 0.0001	Th 156 0.0001	Th 155 0.0001	Th 154 0.0001	Th 153 0.0001	Th 152 0.0001	Th 151 0.0001	Th 150 0.0001	Th 149 0.0001	Th 148 0.0001	Th 147 0.0001	Th 146 0.0001	Th 145 0.0001	Th 144 0.0001	Th 143 0.0001	Th 142 0.0001	Th 141 0.0001	Th 140 0.0001	Th 139 0.0001	Th 138 0.0001	Th 137 0.0001	Th 136 0.0001	Th 135 0.0001	Th 134 0.0001	Th 133 0.0001	Th 132 0.0001	Th 131 0.0001	Th 130 0.0001	Th 129 0.0001	Th 128 0.0001	Th 127 0.0001	Th 126 0.0001	Th 125 0.0001	Th 124 0.0001	Th 123 0.0001	Th 122 0.0001	Th 121 0.0001	Th 120 0.0001	Th 119 0.0001	Th 118 0.0001	Th 117 0.0001	Th 116 0.0001	Th 115 0.0001	Th 114 0.0001	Th 113 0.0001	Th 112 0.0001	Th 111 0.0001	Th 110 0.0001	Th 109 0.0001	Th 108 0.0001	Th 107 0.0001	Th 106 0.0001	Th 105 0.0001	Th 104 0.0001	Th 103 0.0001	Th 102 0.0001	Th 101 0.0001	Th 100 0.0001	Th 99 0.0001	Th 98 0.0001	Th 97 0.0001	Th 96 0.0001	Th 95 0.0001	Th 94 0.0001	Th 93 0.0001	Th 92 0.0001	Th 91 0.0001	Th 90 0.0001	Th 89 0.0001	Th 88 0.0001	Th 87 0.0001	Th 86 0.0001	Th 85 0.0001	Th 84 0.0001	Th 83 0.0001	Th 82 0.0001	Th 81 0.0001	Th 80 0.0001	Th 79 0.0001	Th 78 0.0001	Th 77 0.0001	Th 76 0.0001	Th 75 0.0001	Th 74 0.0001	Th 73 0.0001	Th 72 0.0001	Th 71 0.0001	Th 70 0.0001	Th 69 0.0001	Th 68 0.0001	Th 67 0.0001	Th 66 0.0001	Th 65 0.0001	Th 64 0.0001	Th 63 0.0001	Th 62 0.0001	Th 61 0.0001	Th 60 0.0001	Th 59 0.0001	Th 58 0.0001	Th 57 0.0001	Th 56 0.0001	Th 55 0.0001	Th 54 0.0001	Th 53 0.0001	Th 52 0.0001	Th 51 0.0001	Th 50 0.0001	Th 49 0.0001	Th 48 0.0001	Th 47 0.0001	Th 46 0.0001	Th 45 0.0001	Th 44 0.0001	Th 43 0.0001	Th 42 0.0001	Th 41 0.0001	Th 40 0.0001	Th 39 0.0001	Th 38 0.0001	Th 37 0.0001	Th 36 0.0001	Th 35 0.0001	Th 34 0.0001	Th 33 0.0001	Th 32 0.0001	Th 31 0.0001	Th 30 0.0001	Th 29 0.0001	Th 28 0.0001	Th 27 0.0001	Th 26 0.0001	Th 25 0.0001	Th 24 0.0001	Th 23 0.0001	Th 22 0.0001	Th 21 0.0001	Th 20 0.0001	Th 19 0.0001	Th 18	<table><tr><td>Pa 231.0359</td><td>Th 234 0.133</td><td>Th 233 0.046</td><td>Th 232 0.0001</td><td>Th 231 0.0001</td><td>Th 230 0.0001</td><td>Th 229 0.0001</td><td>Th 228 0.0001</td><td>Th 227 0.0001</td><td>Th 226 0.0001</td><td>Th 225 0.0001</td><td>Th 224 0.0001</td><td>Th 223 0.0001</td><td>Th 222 0.0001</td><td>Th 221 0.0001</td><td>Th 220 0.0001</td><td>Th 219 0.0001</td><td>Th 218 0.0001</td><td>Th 217 0.0001</td><td>Th 216 0.0001</td><td>Th 215 0.0001</td><td>Th 214 0.0001</td><td>Th 213 0.0001</td><td>Th 212 0.0001</td><td>Th 211 0.0001</td><td>Th 210 0.0001</td><td>Th 209 0.0001</td><td>Th 208 0.0001</td><td>Th 207 0.0001</td><td>Th 206 0.0001</td><td>Th 205 0.0001</td><td>Th 204 0.0001</td><td>Th 203 0.0001</td><td>Th 202 0.0001</td><td>Th 201 0.0001</td><td>Th 200 0.0001</td><td>Th 199 0.0001</td><td>Th 198 0.0001</td><td>Th 197 0.0001</td><td>Th 196 0.0001</td><td>Th 195 0.0001</td><td>Th 194 0.0001</td><td>Th 193 0.0001</td><td>Th 192 0.0001</td><td>Th 191 0.0001</td><td>Th 190 0.0001</td><td>Th 189 0.0001</td><td>Th 188 0.0001</td><td>Th 187 0.0001</td><td>Th 186 0.0001</td><td>Th 185 0.0001</td><td>Th 184 0.0001</td><td>Th 183 0.0001</td><td>Th 182 0.0001</td><td>Th 181 0.0001</td><td>Th 180 0.0001</td><td>Th 179 0.0001</td><td>Th 178 0.0001</td><td>Th 177 0.0001</td><td>Th 176 0.0001</td><td>Th 175 0.0001</td><td>Th 174 0.0001</td><td>Th 173 0.0001</td><td>Th 172 0.0001</td><td>Th 171 0.0001</td><td>Th 170 0.0001</td><td>Th 169 0.0001</td><td>Th 168 0.0001</td><td>Th 167 0.0001</td><td>Th 166 0.0001</td><td>Th 165 0.0001</td><td>Th 164 0.0001</td><td>Th 163 0.0001</td><td>Th 162 0.0001</td><td>Th 161 0.0001</td><td>Th 160 0.0001</td><td>Th 159 0.0001</td><td>Th 158 0.0001</td><td>Th 157 0.0001</td><td>Th 156 0.0001</td><td>Th 155 0.0001</td><td>Th 154 0.0001</td><td>Th 153 0.0001</td><td>Th 152 0.0001</td><td>Th 151 0.0001</td><td>Th 150 0.0001</td><td>Th 149 0.0001</td><td>Th 148 0.0001</td><td>Th 147 0.0001</td><td>Th 146 0.0001</td><td>Th 145 0.0001</td><td>Th 144 0.0001</td><td>Th 143 0.0001</td><td>Th 142 0.0001</td><td>Th 141 0.0001</td><td>Th 140 0.0001</td><td>Th 139 0.0001</td><td>Th 138 0.0001</td><td>Th 137 0.0001</td><td>Th 136 0.0001</td><td>Th 135 0.0001</td><td>Th 134 0.0001</td><td>Th 133 0.0001</td><td>Th 132 0.0001</td><td>Th 131 0.0001</td><td>Th 130 0.0001</td><td>Th 129 0.0001</td><td>Th 128 0.0001</td><td>Th 127 0.0001</td><td>Th 126 0.0001</td><td>Th 125 0.0001</td><td>Th 124 0.0001</td><td>Th 123 0.0001</td><td>Th 122 0.0001</td><td>Th 121 0.0001</td><td>Th 120 0.0001</td><td>Th 119 0.0001</td><td>Th 118 0.0001</td><td>Th 117 0.0001</td><td>Th 116 0.0001</td><td>Th 115 0.0001</td><td>Th 114 0.0001</td><td>Th 113 0.0001</td><td>Th 112 0.0001</td><td>Th 111 0.0001</td><td>Th 110 0.0001</td><td>Th 109 0.0001</td><td>Th 108 0.0001</td><td>Th 107 0.0001</td><td>Th 106 0.0001</td><td>Th 105 0.0001</td><td>Th 104 0.0001</td><td>Th 103 0.0001</td><td>Th 102 0.0001</td><td>Th 101 0.0001</td><td>Th 100 0.0001</td><td>Th 99 0.0001</td><td>Th 98 0.0001</td><td>Th 97 0.0001</td><td>Th 96 0.0001</td><td>Th 95 0.0001</td><td>Th 94 0.0001</td><td>Th 93 0.0001</td><td>Th 92 0.0001</td><td>Th 91 0.0001</td><td>Th 90 0.0001</td><td>Th 89 0.0001</td><td>Th 88 0.0001</td><td>Th 87 0.0001</td><td>Th 86 0.0001</td><td>Th 85 0.0001</td><td>Th 84 0.0001</td><td>Th 83 0.0001</td><td>Th 82 0.0001</td><td>Th 81 0.0001</td><td>Th 80 0.0001</td><td>Th 79 0.0001</td><td>Th 78 0.0001</td><td>Th 77 0.0001</td><td>Th 76 0.0001</td><td>Th 75 0.0001</td><td>Th 74 0.0001</td><td>Th 73 0.0001</td><td>Th 72 0.0001</td><td>Th 71 0.0001</td><td>Th 70 0.0001</td><td>Th 69 0.0001</td><td>Th 68 0.0001</td><td>Th 67 0.0001</td><td>Th 66 0.0001</td><td>Th 65 0.0001</td><td>Th 64 0.0001</td><td>Th 63 0.0001</td><td>Th 62 0.0001</td><td>Th 61 0.0001</td><td>Th 60 0.0001</td><td>Th 59 0.0001</td><td>Th 58 0.0001</td><td>Th 57 0.0001</td><td>Th 56 0.0001</td><td>Th 55 0.0001</td><td>Th 54 0.0001</td><td>Th 53 0.0001</td><td>Th 52 0.0001</td><td>Th 51 0.0001</td><td>Th 50 0.0001</td><td>Th 49 0.0001</td><td>Th 48 0.0001</td><td>Th 47 0.0001</td><td>Th 46 0.0001</td><td>Th 45 0.0001</td><td>Th 44 0.0001</td><td>Th 43 0.0001</td><td>Th 42 0.0001</td><td>Th 41 0.0001</td><td>Th 40 0.0001</td><td>Th 39 0.0001</td><td>Th 38 0.0001</td><td>Th 37 0.0001</td><td>Th 36 0.0001</td><td>Th 35 0.0001</td><td>Th 34 0.0001</td><td>Th 33 0.0001</td><td>Th 32 0.0001</td><td>Th 31 0.0001</td><td>Th 30 0.0001</td><td>Th 29 0.0001</td><td>Th 28 0.0001</td><td>Th 27 0.0001</td><td>Th 26 0.0001</td><td>Th 25 0.0001</td><td>Th 24 0.0001</td><td>Th 23 0.0001</td><td>Th 22 0.0001</td><td>Th 21 0.0001</td><td>Th 20 0.0001</td><td>Th 19 0.0001</td><td>Th 18</td></tr></table>	Pa 231.0359	Th 234 0.133	Th 233 0.046	Th 232 0.0001	Th 231 0.0001	Th 230 0.0001	Th 229 0.0001	Th 228 0.0001	Th 227 0.0001	Th 226 0.0001	Th 225 0.0001	Th 224 0.0001	Th 223 0.0001	Th 222 0.0001	Th 221 0.0001	Th 220 0.0001	Th 219 0.0001	Th 218 0.0001	Th 217 0.0001	Th 216 0.0001	Th 215 0.0001	Th 214 0.0001	Th 213 0.0001	Th 212 0.0001	Th 211 0.0001	Th 210 0.0001	Th 209 0.0001	Th 208 0.0001	Th 207 0.0001	Th 206 0.0001	Th 205 0.0001	Th 204 0.0001	Th 203 0.0001	Th 202 0.0001	Th 201 0.0001	Th 200 0.0001	Th 199 0.0001	Th 198 0.0001	Th 197 0.0001	Th 196 0.0001	Th 195 0.0001	Th 194 0.0001	Th 193 0.0001	Th 192 0.0001	Th 191 0.0001	Th 190 0.0001	Th 189 0.0001	Th 188 0.0001	Th 187 0.0001	Th 186 0.0001	Th 185 0.0001	Th 184 0.0001	Th 183 0.0001	Th 182 0.0001	Th 181 0.0001	Th 180 0.0001	Th 179 0.0001	Th 178 0.0001	Th 177 0.0001	Th 176 0.0001	Th 175 0.0001	Th 174 0.0001	Th 173 0.0001	Th 172 0.0001	Th 171 0.0001	Th 170 0.0001	Th 169 0.0001	Th 168 0.0001	Th 167 0.0001	Th 166 0.0001	Th 165 0.0001	Th 164 0.0001	Th 163 0.0001	Th 162 0.0001	Th 161 0.0001	Th 160 0.0001	Th 159 0.0001	Th 158 0.0001	Th 157 0.0001	Th 156 0.0001	Th 155 0.0001	Th 154 0.0001	Th 153 0.0001	Th 152 0.0001	Th 151 0.0001	Th 150 0.0001	Th 149 0.0001	Th 148 0.0001	Th 147 0.0001	Th 146 0.0001	Th 145 0.0001	Th 144 0.0001	Th 143 0.0001	Th 142 0.0001	Th 141 0.0001	Th 140 0.0001	Th 139 0.0001	Th 138 0.0001	Th 137 0.0001	Th 136 0.0001	Th 135 0.0001	Th 134 0.0001	Th 133 0.0001	Th 132 0.0001	Th 131 0.0001	Th 130 0.0001	Th 129 0.0001	Th 128 0.0001	Th 127 0.0001	Th 126 0.0001	Th 125 0.0001	Th 124 0.0001	Th 123 0.0001	Th 122 0.0001	Th 121 0.0001	Th 120 0.0001	Th 119 0.0001	Th 118 0.0001	Th 117 0.0001	Th 116 0.0001	Th 115 0.0001	Th 114 0.0001	Th 113 0.0001	Th 112 0.0001	Th 111 0.0001	Th 110 0.0001	Th 109 0.0001	Th 108 0.0001	Th 107 0.0001	Th 106 0.0001	Th 105 0.0001	Th 104 0.0001	Th 103 0.0001	Th 102 0.0001	Th 101 0.0001	Th 100 0.0001	Th 99 0.0001	Th 98 0.0001	Th 97 0.0001	Th 96 0.0001	Th 95 0.0001	Th 94 0.0001	Th 93 0.0001	Th 92 0.0001	Th 91 0.0001	Th 90 0.0001	Th 89 0.0001	Th 88 0.0001	Th 87 0.0001	Th 86 0.0001	Th 85 0.0001	Th 84 0.0001	Th 83 0.0001	Th 82 0.0001	Th 81 0.0001	Th 80 0.0001	Th 79 0.0001	Th 78 0.0001	Th 77 0.0001	Th 76 0.0001	Th 75 0.0001	Th 74 0.0001	Th 73 0.0001	Th 72 0.0001	Th 71 0.0001	Th 70 0.0001	Th 69 0.0001	Th 68 0.0001	Th 67 0.0001	Th 66 0.0001	Th 65 0.0001	Th 64 0.0001	Th 63 0.0001	Th 62 0.0001	Th 61 0.0001	Th 60 0.0001	Th 59 0.0001	Th 58 0.0001	Th 57 0.0001	Th 56 0.0001	Th 55 0.0001	Th 54 0.0001	Th 53 0.0001	Th 52 0.0001	Th 51 0.0001	Th 50 0.0001	Th 49 0.0001	Th 48 0.0001	Th 47 0.0001	Th 46 0.0001	Th 45 0.0001	Th 44 0.0001	Th 43 0.0001	Th 42 0.0001	Th 41 0.0001	Th 40 0.0001	Th 39 0.0001	Th 38 0.0001	Th 37 0.0001	Th 36 0.0001	Th 35 0.0001	Th 34 0.0001	Th 33 0.0001	Th 32 0.0001	Th 31 0.0001	Th 30 0.0001	Th 29 0.0001	Th 28 0.0001	Th 27 0.0001	Th 26 0.0001	Th 25 0.0001	Th 24 0.0001	Th 23 0.0001	Th 22 0.0001	Th 21 0.0001	Th 20 0.0001	Th 19 0.0001	Th 18	<table><tr><td>Pa 231.0359</td><td>Th 234 0.133</td><td>Th 233 0.046</td><td>Th 232 0.0001</td><td>Th 231 0.0001</td><td>Th 230 0.0001</td><td>Th 229 0.0001</td><td>Th 228 0.0001</td><td>Th 227 0.0001</td><td>Th 226 0.0001</td><td>Th 225 0.0001</td><td>Th 224 0.0001</td><td>Th 223 0.0001</td><td>Th 222 0.0001</td><td>Th 221 0.0001</td><td>Th 220 0.0001</td><td>Th 219 0.0001</td><td>Th 218 0.0001</td><td>Th 217 0.0001</td><td>Th 216 0.0001</td><td>Th 215 0.0001</td><td>Th 214 0.0001</td><td>Th 213 0.0001</td><td>Th 212 0.0001</td><td>Th 211 0.0001</td><td>Th 210 0.0001</td><td>Th 209 0.0001</td><td>Th 208 0.0001</td><td>Th 207 0.0001</td><td>Th 206 0.0001</td><td>Th 205 0.0001</td><td>Th 204 0.0001</td><td>Th 203 0.0001</td><td>Th 202 0.0001</td><td>Th 201 0.0001</td><td>Th 200 0.0001</td><td>Th 199 0.0001</td><td>Th 198 0.0001</td><td>Th 197 0.0001</td><td>Th 196 0.0001</td><td>Th 195 0.0001</td><td>Th 194 0.0001</td><td>Th 193 0.0001</td><td>Th 192 0.0001</td><td>Th 191 0.0001</td><td>Th 190 0.0001</td><td>Th 189 0.0001</td><td>Th 188 0.0001</td><td>Th 187 0.0001</td><td>Th 186 0.0001</td><td>Th 185 0.0001</td><td>Th 184 0.0001</td><td>Th 183 0.0001</td><td>Th 182 0.0001</td><td>Th 181 0.0001</td><td>Th 180 0.0001</td><td>Th 179 0.0001</td><td>Th 178 0.0001</td><td>Th 177 0.0001</td><td>Th 176 0.0001</td><td>Th 175 0.0001</td><td>Th 174 0.0001</td><td>Th 173 0.0001</td><td>Th 172 0.0001</td><td>Th 171 0.0001</td><td>Th 170 0.0001</td><td>Th 169 0.0001</td><td>Th 168 0.0001</td><td>Th 167 0.0001</td><td>Th 166 0.0001</td><td>Th 165 0.0001</td><td>Th 164 0.0001</td><td>Th 163 0.0001</td><td>Th 162 0.0001</td><td>Th 161 0.0001</td><td>Th 160 0.0001</td><td>Th 159 0.0001</td><td>Th 158 0.0001</td><td>Th 157 0.0001</td><td>Th 156 0.0001</td><td>Th 155 0.0001</td><td>Th 154 0.0001</td><td>Th 153 0.0001</td><td>Th 152 0.0001</td><td>Th 151 0.0001</td><td>Th 150 0.0001</td><td>Th 149 0.0001</td><td>Th 148 0.0001</td><td>Th 147 0.0001</td><td>Th 146 0.0001</td><td>Th 145 0.0001</td><td>Th 144 0.0001</td><td>Th 143 0.0001</td><td>Th 142 0.0001</td><td>Th 141 0.0001</td><td>Th 140 0.0001</td><td>Th 139 0.0001</td><td>Th 138 0.0001</td><td>Th 137 0.0001</td><td>Th 136 0.0001</td><td>Th 135 0.0001</td><td>Th 134 0.0001</td><td>Th 133 0.0001</td><td>Th 132 0.0001</td><td>Th 131 0.0001</td><td>Th 130 0.0001</td><td>Th 129 0.0001</td><td>Th 128 0.0001</td><td>Th 127 0.0001</td><td>Th 126 0.0001</td><td>Th 125 0.0001</td><td>Th 124 0.0001</td><td>Th 123 0.0001</td><td>Th 122 0.0001</td><td>Th 121 0.0001</td><td>Th 120 0.0001</td><td>Th 119 0.0001</td><td>Th 118 0.0001</td><td>Th 117 0.0001</td><td>Th 116 0.0001</td><td>Th 115 0.0001</td><td>Th 114 0.0001</td><td>Th 113 0.0001</td><td>Th 112 0.0001</td><td>Th 111 0.0001</td><td>Th 110 0.0001</td><td>Th 109 0.0001</td><td>Th 108 0.0001</td><td>Th 107 0.0001</td><td>Th 106 0.0001</td><td>Th 105 0.0001</td><td>Th 104 0.0001</td><td>Th 103 0.0001</td><td>Th 102 0.0001</td><td>Th 101 0.0001</td><td>Th 100 0.0001</td><td>Th 99 0.0001</td><td>Th 98 0.0001</td><td>Th 97 0.0001</td><td>Th 96 0.0001</td><td>Th 95 0.0001</td><td>Th 94 0.0001</td><td>Th 93 0.0001</td><td>Th 92 0.0001</td><td>Th 91 0.0001</td><td>Th 90 0.0001</td><td>Th 89 0.0001</td><td>Th 88 0.0001</td><td>Th 87 0.0001</td><td>Th 86 0.0001</td><td>Th 85 0.0001</td><td>Th 84 0.0001</td><td>Th 83 0.0001</td><td>Th 82 0.0001</td><td>Th 81 0.0001</td><td>Th 80 0.0001</td><td>Th 79 0.0001</td><td>Th 78 0.0001</td><td>Th 77 0.0001</td><td>Th 76 0.0001</td><td>Th 75 0.0001</td><td>Th 74 0.0001</td><td>Th 73 0.0001</td><td>Th 72 0.0001</td><td>Th 71 0.0001</td><td>Th 70 0.0001</td><td>Th 69 0.0001</td><td>Th 68 0.0001</td><td>Th 67 0.0001</td><td>Th 66 0.0001</td><td>Th 65 0.0001</td><td>Th 64 0.0001</td><td>Th 63 0.0001</td><td>Th 62 0.0001</td><td>Th 61 0.0001</td><td>Th 60 0.0001</td><td>Th 59 0.0001</td><td>Th 58 0.0001</td><td>Th 57 0.0001</td><td>Th 56 0.0001</td><td>Th 55 0.0001</td><td>Th 54 0.0001</td><td>Th 53 0.0001</td><td>Th 52 0.0001</td><td>Th 51 0.0001</td><td>Th 50 0.0001</td><td>Th 49 0.0001</td><td>Th 48 0.0001</td><td>Th 47 0.0001</td><td>Th 46 0.0001</td><td>Th 45 0.0001</td><td>Th 44 0.0001</td><td>Th 43 0.0001</td><td>Th 42 0.0001</td><td>Th 41 0.0001</td><td>Th 40 0.0001</td><td>Th 39 0.0001</td><td>Th 38 0.0001</td><td>Th 37 0.0001</td><td>Th 36 0.0001</td><td>Th 35 0.0001</td><td>Th 34 0.0001</td><td>Th 33 0.0001</td><td>Th 32 0.0001</td><td>Th 31 0.0001</td><td>Th 30 0.0001</td><td>Th 29 0.0001</td><td>Th 28 0.0001</td><td>Th 27 0.0001</td><td>Th 26 0.0001</td><td>Th 25 0.0001</td><td>Th 24 0.0001</td><td>Th 23 0.0001</td><td>Th 22 0.0001</td><td>Th 21 0.0001</td><td>Th 20 0.0001</td><td>Th 19 0.0001</td><td>Th 18</td></tr></table>	Pa 231.0359	Th 234 0.133	Th 233 0.046	Th 232 0.0001	Th 231 0.0001	Th 230 0.0001	Th 229 0.0001	Th 228 0.0001	Th 227 0.0001	Th 226 0.0001	Th 225 0.0001	Th 224 0.0001	Th 223 0.0001	Th 222 0.0001	Th 221 0.0001	Th 220 0.0001	Th 219 0.0001	Th 218 0.0001	Th 217 0.0001	Th 216 0.0001	Th 215 0.0001	Th 214 0.0001	Th 213 0.0001	Th 212 0.0001	Th 211 0.0001	Th 210 0.0001	Th 209 0.0001	Th 208 0.0001	Th 207 0.0001	Th 206 0.0001	Th 205 0.0001	Th 204 0.0001	Th 203 0.0001	Th 202 0.0001	Th 201 0.0001	Th 200 0.0001	Th 199 0.0001	Th 198 0.0001	Th 197 0.0001	Th 196 0.0001	Th 195 0.0001	Th 194 0.0001	Th 193 0.0001	Th 192 0.0001	Th 191 0.0001	Th 190 0.0001	Th 189 0.0001	Th 188 0.0001	Th 187 0.0001	Th 186 0.0001	Th 185 0.0001	Th 184 0.0001	Th 183 0.0001	Th 182 0.0001	Th 181 0.0001	Th 180 0.0001	Th 179 0.0001	Th 178 0.0001	Th 177 0.0001	Th 176 0.0001	Th 175 0.0001	Th 174 0.0001	Th 173 0.0001	Th 172 0.0001	Th 171 0.0001	Th 170 0.0001	Th 169 0.0001	Th 168 0.0001	Th 167 0.0001	Th 166 0.0001	Th 165 0.0001	Th 164 0.0001	Th 163 0.0001	Th 162 0.0001	Th 161 0.0001	Th 160 0.0001	Th 159 0.0001	Th 158 0.0001	Th 157 0.0001	Th 156 0.0001	Th 155 0.0001	Th 154 0.0001	Th 153 0.0001	Th 152 0.0001	Th 151 0.0001	Th 150 0.0001	Th 149 0.0001	Th 148 0.0001	Th 147 0.0001	Th 146 0.0001	Th 145 0.0001	Th 144 0.0001	Th 143 0.0001	Th 142 0.0001	Th 141 0.0001	Th 140 0.0001	Th 139 0.0001	Th 138 0.0001	Th 137 0.0001	Th 136 0.0001	Th 135 0.0001	Th 134 0.0001	Th 133 0.0001	Th 132 0.0001	Th 131 0.0001	Th 130 0.0001	Th 129 0.0001	Th 128 0.0001	Th 127 0.0001	Th 126 0.0001	Th 125 0.0001	Th 124 0.0001	Th 123 0.0001	Th 122 0.0001	Th 121 0.0001	Th 120 0.0001	Th 119 0.0001	Th 118 0.0001	Th 117 0.0001	Th 116 0.0001	Th 115 0.0001	Th 114 0.0001	Th 113 0.0001	Th 112 0.0001	Th 111 0.0001	Th 110 0.0001	Th 109 0.0001	Th 108 0.0001	Th 107 0.0001	Th 106 0.0001	Th 105 0.0001	Th 104 0.0001	Th 103 0.0001	Th 102 0.0001	Th 101 0.0001	Th 100 0.0001	Th 99 0.0001	Th 98 0.0001	Th 97 0.0001	Th 96 0.0001	Th 95 0.0001	Th 94 0.0001	Th 93 0.0001	Th 92 0.0001	Th 91 0.0001	Th 90 0.0001	Th 89 0.0001	Th 88 0.0001	Th 87 0.0001	Th 86 0.0001	Th 85 0.0001	Th 84 0.0001	Th 83 0.0001	Th 82 0.0001	Th 81 0.0001	Th 80 0.0001	Th 79 0.0001	Th 78 0.0001	Th 77 0.0001	Th 76 0.0001	Th 75 0.0001	Th 74 0.0001	Th 73 0.0001	Th 72 0.0001	Th 71 0.0001	Th 70 0.0001	Th 69 0.0001	Th 68 0.0001	Th 67 0.0001	Th 66 0.0001	Th 65 0.0001	Th 64 0.0001	Th 63 0.0001	Th 62 0.0001	Th 61 0.0001	Th 60 0.0001	Th 59 0.0001	Th 58 0.0001	Th 57 0.0001	Th 56 0.0001	Th 55 0.0001	Th 54 0.0001	Th 53 0.0001	Th 52 0.0001	Th 51 0.0001	Th 50 0.0001	Th 49 0.0001	Th 48 0.0001	Th 47 0.0001	Th 46 0.0001	Th 45 0.0001	Th 44 0.0001	Th 43 0.0001	Th 42 0.0001	Th 41 0.0001	Th 40 0.0001	Th 39 0.0001	Th 38 0.0001	Th 37 0.0001	Th 36 0.0001	Th 35 0.0001	Th 34 0.0001	Th 33 0.0001	Th 32 0.0001	Th 31 0.0001	Th 30 0.0001	Th 29 0.0001	Th 28 0.0001	Th 27 0.0001	Th 26 0.0001	Th 25 0.0001	Th 24 0.0001	Th 23 0.0001	Th 22 0.0001	Th 21 0.0001	Th 20 0.0001	Th 19 0.0001	Th 18
Pa 231.0359	Th 234 0.133	Th 233 0.046	Th 232 0.0001	Th 231 0.0001	Th 230 0.0001	Th 229 0.0001	Th 228 0.0001	Th 227 0.0001	Th 226 0.0001	Th 225 0.0001	Th 224 0.0001	Th 223 0.0001	Th 222 0.0001	Th 221 0.0001	Th 220 0.0001	Th 219 0.0001	Th 218 0.0001	Th 217 0.0001	Th 216 0.0001	Th 215 0.0001	Th 214 0.0001	Th 213 0.0001	Th 212 0.0001	Th 211 0.0001	Th 210 0.0001	Th 209 0.0001	Th 208 0.0001	Th 207 0.0001	Th 206 0.0001	Th 205 0.0001	Th 204 0.0001	Th 203 0.0001	Th 202 0.0001	Th 201 0.0001	Th 200 0.0001	Th 199 0.0001	Th 198 0.0001	Th 197 0.0001	Th 196 0.0001	Th 195 0.0001	Th 194 0.0001	Th 193 0.0001	Th 192 0.0001	Th 191 0.0001	Th 190 0.0001	Th 189 0.0001	Th 188 0.0001	Th 187 0.0001	Th 186 0.0001	Th 185 0.0001	Th 184 0.0001	Th 183 0.0001	Th 182 0.0001	Th 181 0.0001	Th 180 0.0001	Th 179 0.0001	Th 178 0.0001	Th 177 0.0001	Th 176 0.0001	Th 175 0.0001	Th 174 0.0001	Th 173 0.0001	Th 172 0.0001	Th 171 0.0001	Th 170 0.0001	Th 169 0.0001	Th 168 0.0001	Th 167 0.0001	Th 166 0.0001	Th 165 0.0001	Th 164 0.0001	Th 163 0.0001	Th 162 0.0001	Th 161 0.0001	Th 160 0.0001	Th 159 0.0001	Th 158 0.0001	Th 157 0.0001	Th 156 0.0001	Th 155 0.0001	Th 154 0.0001	Th 153 0.0001	Th 152 0.0001	Th 151 0.0001	Th 150 0.0001	Th 149 0.0001	Th 148 0.0001	Th 147 0.0001	Th 146 0.0001	Th 145 0.0001	Th 144 0.0001	Th 143 0.0001	Th 142 0.0001	Th 141 0.0001	Th 140 0.0001	Th 139 0.0001	Th 138 0.0001	Th 137 0.0001	Th 136 0.0001	Th 135 0.0001	Th 134 0.0001	Th 133 0.0001	Th 132 0.0001	Th 131 0.0001	Th 130 0.0001	Th 129 0.0001	Th 128 0.0001	Th 127 0.0001	Th 126 0.0001	Th 125 0.0001	Th 124 0.0001	Th 123 0.0001	Th 122 0.0001	Th 121 0.0001	Th 120 0.0001	Th 119 0.0001	Th 118 0.0001	Th 117 0.0001	Th 116 0.0001	Th 115 0.0001	Th 114 0.0001	Th 113 0.0001	Th 112 0.0001	Th 111 0.0001	Th 110 0.0001	Th 109 0.0001	Th 108 0.0001	Th 107 0.0001	Th 106 0.0001	Th 105 0.0001	Th 104 0.0001	Th 103 0.0001	Th 102 0.0001	Th 101 0.0001	Th 100 0.0001	Th 99 0.0001	Th 98 0.0001	Th 97 0.0001	Th 96 0.0001	Th 95 0.0001	Th 94 0.0001	Th 93 0.0001	Th 92 0.0001	Th 91 0.0001	Th 90 0.0001	Th 89 0.0001	Th 88 0.0001	Th 87 0.0001	Th 86 0.0001	Th 85 0.0001	Th 84 0.0001	Th 83 0.0001	Th 82 0.0001	Th 81 0.0001	Th 80 0.0001	Th 79 0.0001	Th 78 0.0001	Th 77 0.0001	Th 76 0.0001	Th 75 0.0001	Th 74 0.0001	Th 73 0.0001	Th 72 0.0001	Th 71 0.0001	Th 70 0.0001	Th 69 0.0001	Th 68 0.0001	Th 67 0.0001	Th 66 0.0001	Th 65 0.0001	Th 64 0.0001	Th 63 0.0001	Th 62 0.0001	Th 61 0.0001	Th 60 0.0001	Th 59 0.0001	Th 58 0.0001	Th 57 0.0001	Th 56 0.0001	Th 55 0.0001	Th 54 0.0001	Th 53 0.0001	Th 52 0.0001	Th 51 0.0001	Th 50 0.0001	Th 49 0.0001	Th 48 0.0001	Th 47 0.0001	Th 46 0.0001	Th 45 0.0001	Th 44 0.0001	Th 43 0.0001	Th 42 0.0001	Th 41 0.0001	Th 40 0.0001	Th 39 0.0001	Th 38 0.0001	Th 37 0.0001	Th 36 0.0001	Th 35 0.0001	Th 34 0.0001	Th 33 0.0001	Th 32 0.0001	Th 31 0.0001	Th 30 0.0001	Th 29 0.0001	Th 28 0.0001	Th 27 0.0001	Th 26 0.0001	Th 25 0.0001	Th 24 0.0001	Th 23 0.0001	Th 22 0.0001	Th 21 0.0001	Th 20 0.0001	Th 19 0.0001	Th 18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Pa 231.0359	Th 234 0.133	Th 233 0.046	Th 232 0.0001	Th 231 0.0001	Th 230 0.0001	Th 229 0.0001	Th 228 0.0001	Th 227 0.0001	Th 226 0.0001	Th 225 0.0001	Th 224 0.0001	Th 223 0.0001	Th 222 0.0001	Th 221 0.0001	Th 220 0.0001	Th 219 0.0001	Th 218 0.0001	Th 217 0.0001	Th 216 0.0001	Th 215 0.0001	Th 214 0.0001	Th 213 0.0001	Th 212 0.0001	Th 211 0.0001	Th 210 0.0001	Th 209 0.0001	Th 208 0.0001	Th 207 0.0001	Th 206 0.0001	Th 205 0.0001	Th 204 0.0001	Th 203 0.0001	Th 202 0.0001	Th 201 0.0001	Th 200 0.0001	Th 199 0.0001	Th 198 0.0001	Th 197 0.0001	Th 196 0.0001	Th 195 0.0001	Th 194 0.0001	Th 193 0.0001	Th 192 0.0001	Th 191 0.0001	Th 190 0.0001	Th 189 0.0001	Th 188 0.0001	Th 187 0.0001	Th 186 0.0001	Th 185 0.0001	Th 184 0.0001	Th 183 0.0001	Th 182 0.0001	Th 181 0.0001	Th 180 0.0001	Th 179 0.0001	Th 178 0.0001	Th 177 0.0001	Th 176 0.0001	Th 175 0.0001	Th 174 0.0001	Th 173 0.0001	Th 172 0.0001	Th 171 0.0001	Th 170 0.0001	Th 169 0.0001	Th 168 0.0001	Th 167 0.0001	Th 166 0.0001	Th 165 0.0001	Th 164 0.0001	Th 163 0.0001	Th 162 0.0001	Th 161 0.0001	Th 160 0.0001	Th 159 0.0001	Th 158 0.0001	Th 157 0.0001	Th 156 0.0001	Th 155 0.0001	Th 154 0.0001	Th 153 0.0001	Th 152 0.0001	Th 151 0.0001	Th 150 0.0001	Th 149 0.0001	Th 148 0.0001	Th 147 0.0001	Th 146 0.0001	Th 145 0.0001	Th 144 0.0001	Th 143 0.0001	Th 142 0.0001	Th 141 0.0001	Th 140 0.0001	Th 139 0.0001	Th 138 0.0001	Th 137 0.0001	Th 136 0.0001	Th 135 0.0001	Th 134 0.0001	Th 133 0.0001	Th 132 0.0001	Th 131 0.0001	Th 130 0.0001	Th 129 0.0001	Th 128 0.0001	Th 127 0.0001	Th 126 0.0001	Th 125 0.0001	Th 124 0.0001	Th 123 0.0001	Th 122 0.0001	Th 121 0.0001	Th 120 0.0001	Th 119 0.0001	Th 118 0.0001	Th 117 0.0001	Th 116 0.0001	Th 115 0.0001	Th 114 0.0001	Th 113 0.0001	Th 112 0.0001	Th 111 0.0001	Th 110 0.0001	Th 109 0.0001	Th 108 0.0001	Th 107 0.0001	Th 106 0.0001	Th 105 0.0001	Th 104 0.0001	Th 103 0.0001	Th 102 0.0001	Th 101 0.0001	Th 100 0.0001	Th 99 0.0001	Th 98 0.0001	Th 97 0.0001	Th 96 0.0001	Th 95 0.0001	Th 94 0.0001	Th 93 0.0001	Th 92 0.0001	Th 91 0.0001	Th 90 0.0001	Th 89 0.0001	Th 88 0.0001	Th 87 0.0001	Th 86 0.0001	Th 85 0.0001	Th 84 0.0001	Th 83 0.0001	Th 82 0.0001	Th 81 0.0001	Th 80 0.0001	Th 79 0.0001	Th 78 0.0001	Th 77 0.0001	Th 76 0.0001	Th 75 0.0001	Th 74 0.0001	Th 73 0.0001	Th 72 0.0001	Th 71 0.0001	Th 70 0.0001	Th 69 0.0001	Th 68 0.0001	Th 67 0.0001	Th 66 0.0001	Th 65 0.0001	Th 64 0.0001	Th 63 0.0001	Th 62 0.0001	Th 61 0.0001	Th 60 0.0001	Th 59 0.0001	Th 58 0.0001	Th 57 0.0001	Th 56 0.0001	Th 55 0.0001	Th 54 0.0001	Th 53 0.0001	Th 52 0.0001	Th 51 0.0001	Th 50 0.0001	Th 49 0.0001	Th 48 0.0001	Th 47 0.0001	Th 46 0.0001	Th 45 0.0001	Th 44 0.0001	Th 43 0.0001	Th 42 0.0001	Th 41 0.0001	Th 40 0.0001	Th 39 0.0001	Th 38 0.0001	Th 37 0.0001	Th 36 0.0001	Th 35 0.0001	Th 34 0.0001	Th 33 0.0001	Th 32 0.0001	Th 31 0.0001	Th 30 0.0001	Th 29 0.0001	Th 28 0.0001	Th 27 0.0001	Th 26 0.0001	Th 25 0.0001	Th 24 0.0001	Th 23 0.0001	Th 22 0.0001	Th 21 0.0001	Th 20 0.0001	Th 19 0.0001	Th 18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Pa 231.0359	Th 234 0.133	Th 233 0.046	Th 232 0.0001	Th 231 0.0001	Th 230 0.0001	Th 229 0.0001	Th 228 0.0001	Th 227 0.0001	Th 226 0.0001	Th 225 0.0001	Th 224 0.0001	Th 223 0.0001	Th 222 0.0001	Th 221 0.0001	Th 220 0.0001	Th 219 0.0001	Th 218 0.0001	Th 217 0.0001	Th 216 0.0001	Th 215 0.0001	Th 214 0.0001	Th 213 0.0001	Th 212 0.0001	Th 211 0.0001	Th 210 0.0001	Th 209 0.0001	Th 208 0.0001	Th 207 0.0001	Th 206 0.0001	Th 205 0.0001	Th 204 0.0001	Th 203 0.0001	Th 202 0.0001	Th 201 0.0001	Th 200 0.0001	Th 199 0.0001	Th 198 0.0001	Th 197 0.0001	Th 196 0.0001	Th 195 0.0001	Th 194 0.0001	Th 193 0.0001	Th 192 0.0001	Th 191 0.0001	Th 190 0.0001	Th 189 0.0001	Th 188 0.0001	Th 187 0.0001	Th 186 0.0001	Th 185 0.0001	Th 184 0.0001	Th 183 0.0001	Th 182 0.0001	Th 181 0.0001	Th 180 0.0001	Th 179 0.0001	Th 178 0.0001	Th 177 0.0001	Th 176 0.0001	Th 175 0.0001	Th 174 0.0001	Th 173 0.0001	Th 172 0.0001	Th 171 0.0001	Th 170 0.0001	Th 169 0.0001	Th 168 0.0001	Th 167 0.0001	Th 166 0.0001	Th 165 0.0001	Th 164 0.0001	Th 163 0.0001	Th 162 0.0001	Th 161 0.0001	Th 160 0.0001	Th 159 0.0001	Th 158 0.0001	Th 157 0.0001	Th 156 0.0001	Th 155 0.0001	Th 154 0.0001	Th 153 0.0001	Th 152 0.0001	Th 151 0.0001	Th 150 0.0001	Th 149 0.0001	Th 148 0.0001	Th 147 0.0001	Th 146 0.0001	Th 145 0.0001	Th 144 0.0001	Th 143 0.0001	Th 142 0.0001	Th 141 0.0001	Th 140 0.0001	Th 139 0.0001	Th 138 0.0001	Th 137 0.0001	Th 136 0.0001	Th 135 0.0001	Th 134 0.0001	Th 133 0.0001	Th 132 0.0001	Th 131 0.0001	Th 130 0.0001	Th 129 0.0001	Th 128 0.0001	Th 127 0.0001	Th 126 0.0001	Th 125 0.0001	Th 124 0.0001	Th 123 0.0001	Th 122 0.0001	Th 121 0.0001	Th 120 0.0001	Th 119 0.0001	Th 118 0.0001	Th 117 0.0001	Th 116 0.0001	Th 115 0.0001	Th 114 0.0001	Th 113 0.0001	Th 112 0.0001	Th 111 0.0001	Th 110 0.0001	Th 109 0.0001	Th 108 0.0001	Th 107 0.0001	Th 106 0.0001	Th 105 0.0001	Th 104 0.0001	Th 103 0.0001	Th 102 0.0001	Th 101 0.0001	Th 100 0.0001	Th 99 0.0001	Th 98 0.0001	Th 97 0.0001	Th 96 0.0001	Th 95 0.0001	Th 94 0.0001	Th 93 0.0001	Th 92 0.0001	Th 91 0.0001	Th 90 0.0001	Th 89 0.0001	Th 88 0.0001	Th 87 0.0001	Th 86 0.0001	Th 85 0.0001	Th 84 0.0001	Th 83 0.0001	Th 82 0.0001	Th 81 0.0001	Th 80 0.0001	Th 79 0.0001	Th 78 0.0001	Th 77 0.0001	Th 76 0.0001	Th 75 0.0001	Th 74 0.0001	Th 73 0.0001	Th 72 0.0001	Th 71 0.0001	Th 70 0.0001	Th 69 0.0001	Th 68 0.0001	Th 67 0.0001	Th 66 0.0001	Th 65 0.0001	Th 64 0.0001	Th 63 0.0001	Th 62 0.0001	Th 61 0.0001	Th 60 0.0001	Th 59 0.0001	Th 58 0.0001	Th 57 0.0001	Th 56 0.0001	Th 55 0.0001	Th 54 0.0001	Th 53 0.0001	Th 52 0.0001	Th 51 0.0001	Th 50 0.0001	Th 49 0.0001	Th 48 0.0001	Th 47 0.0001	Th 46 0.0001	Th 45 0.0001	Th 44 0.0001	Th 43 0.0001	Th 42 0.0001	Th 41 0.0001	Th 40 0.0001	Th 39 0.0001	Th 38 0.0001	Th 37 0.0001	Th 36 0.0001	Th 35 0.0001	Th 34 0.0001	Th 33 0.0001	Th 32 0.0001	Th 31 0.0001	Th 30 0.0001	Th 29 0.0001	Th 28 0.0001	Th 27 0.0001	Th 26 0.0001	Th 25 0.0001	Th 24 0.0001	Th 23 0.0001	Th 22 0.0001	Th 21 0.0001	Th 20 0.0001	Th 19 0.0001	Th 18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							



										100		Pm 3.2m 4.3m	
										99		Es 3.6m 4.0m	
										98		97	
										96		95	
										94		93	
										92		91	
										90		89	
										88		87	
										86		85	
										84		83	
										82		81	
										80		79	
										78		77	
										76		75	
										74		73	
										72		71	
										70		69	
										68		67	
										66		65	
										64		63	
										62		61	
										60		59	
										58		57	
										56		55	
										54		53	
										52		51	
										50		49	
										48		47	
										46		45	
										44		43	
										42		41	
										40		39	
										38		37	
										36		35	
										34		33	
										32		31	
										30		29	
										28		27	
										26		25	
										24		23	
										22		21	
										20		19	
										18		17	
										16		15	
										14		13	
										12		11	
										10		9	
										8		7	
										6		5	
										4		3	
										2		1	

										106		280? 1.9 1.9x10 <sup>10</sup> 1.7		281 1.8 1.8x10 <sup>10</sup> 1.7		282 -60 -60x10 <sup>10</sup> 1.7					
										104		257 4.6 1.9x10 <sup>10</sup> 1.7		280? 1.9 1.9x10 <sup>10</sup> 1.7		258 3 1.9x10 <sup>10</sup> 1.7		280 1.9 1.9x10 <sup>10</sup> 1.7		281 8.6 1.9x10 <sup>10</sup> 1.7	
										103		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7	
										103		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7		17 1.7 1.7x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No		No 281 0.6 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 282 2.1 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 283 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 284 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 285 2.3 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 286 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 287 2.1 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 288 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 289 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 290 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 291 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 292 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 293 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 294 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 295 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 296 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 297 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 298 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 299 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 300 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 301 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 302 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 303 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 304 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 305 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 306 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 307 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 308 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 309 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 310 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 311 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 312 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 313 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 314 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 315 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 316 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 317 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 318 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 319 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 320 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 321 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 322 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 323 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 324 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 325 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 326 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 327 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 328 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 329 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 330 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 331 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 332 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 333 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 334 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 335 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 336 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 337 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 338 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 339 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 340 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 341 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 342 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 343 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 344 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 345 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 346 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 347 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 348 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 349 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 350 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 351 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 352 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 353 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 354 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 355 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 356 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 357 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 358 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 359 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 360 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 361 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 362 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 363 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 364 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 365 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 366 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 367 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 368 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 369 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 370 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 371 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 372 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 373 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 374 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 375 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 376 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 377 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 378 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 379 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 380 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 381 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 382 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 383 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 384 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 385 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 386 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 387 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 388 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 389 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 390 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 391 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 392 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 393 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 394 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 395 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 396 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 397 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 398 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 399 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 400 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 401 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 402 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 403 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 404 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 405 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 406 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 407 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 408 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 409 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 410 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 411 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 412 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 413 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 414 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 415 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 416 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 417 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 418 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 419 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 420 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 421 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 422 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 423 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 424 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 425 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 426 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 427 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 428 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 429 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 430 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 431 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 432 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 433 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 434 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 435 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 436 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 437 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 438 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 439 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 440 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 441 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 442 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 443 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 444 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 445 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 446 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 447 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 448 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 449 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 450 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 451 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 452 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 453 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 454 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 455 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 456 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 457 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 458 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 459 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 460 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 461 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 462 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 463 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 464 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 465 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 466 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 467 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 468 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 469 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 470 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 471 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 472 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 473 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 474 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 475 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 476 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 477 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 478 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 479 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 480 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 481 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 482 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 483 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 484 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 485 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 486 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 487 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 488 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 489 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 490 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 491 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 492 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 493 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 494 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 495 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 496 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 497 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 498 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 499 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 500 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 501 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 502 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 503 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 504 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 505 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 506 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 507 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 508 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 509 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 510 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 511 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 512 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 513 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 514 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 515 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 516 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 517 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 518 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 519 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 520 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 521 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 522 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 523 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 524 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 525 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 526 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 527 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 528 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 529 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 530 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 531 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 532 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 533 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 534 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 535 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 536 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 537 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 538 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 539 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 540 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 541 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 542 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 543 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 544 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 545 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 546 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 547 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 548 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 549 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 550 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 551 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 552 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 553 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 554 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 555 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7	
102										No 556 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 557 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 558 1.8 1.0x10 <sup>10</sup> 1.7		No 559 1.8 1.0x10 <sup></sup>					



Bibliotheca Alexandrina



0636582

ISBN 9957-05-091-5 (ردمك)